

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-062578

(43)Date of publication of application : 13.03.2001

(51)Int.Cl.

B23K 26/00
B23K 26/06
G02B 5/18
G02B 13/18
G02B 26/00
G02B 26/10
H05K 3/00
// B23K101:42

(21)Application number : 2000-154514

(71)Applicant : SUMITOMO ELECTRIC IND LTD

(22)Date of filing : 25.05.2000

(72)Inventor : FUSE TAKASHI

(30)Priority

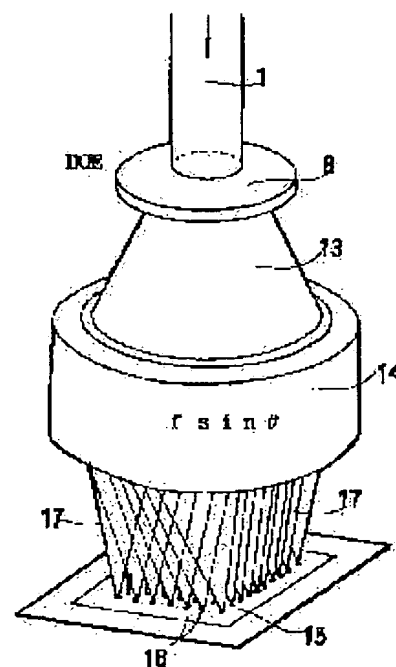
Priority number : 11177376 Priority date : 23.06.1999 Priority country : JP

(54) LASER PIERCE PROCESSING DEVICE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To make multiple holes on a printed substrate and an IC package at once by combining a laser, a diffraction type optical part which includes an identical repetitive pattern of a constant spacing period and the modulated repetitive pattern and diffracts the laser lights so as to generate multiple beams, and an fsin θ lens for condensing multiple branching beams.

SOLUTION: A parallel incident laser beam 1 from a laser is divided into diffraction beams 13 having two-dimensional expansion by a diffraction type optical part (DOE) 8. The diffraction beam 13 is formed into a light condensing divided beam 17 by a light condensing (fsin θ) lens 14, and radiated to a package 15 so as to make multiple holes 16 at once. Plural different diffraction type optical parts are manufactured and mounted to a rotary disc, and the disc is rotated, so that the diffraction type optical part can be spontaneously exchanged. If a hybrid system in combination of a galvano mirror and the diffraction type optical part is adopted, wide range degree of freedom is acquired for dealing with any hole arrangement.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 25.05.2000

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3346374

[Date of registration] 06.09.2002

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision]

BEST AVAILABLE COPY

of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-62578

(P2001-62578A)

(43) 公開日 平成13年3月13日 (2001.3.13)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード(参考)
B 2 3 K 26/00 26/06	3 3 0	B 2 3 K 26/00 26/06	3 3 0 E J
G 0 2 B 5/18 13/18		G 0 2 B 5/18 13/18	
審査請求 有 請求項の数13 O L (全 25 頁) 最終頁に続く			

(21) 出願番号 特願2000-154514(P2000-154514)

(22) 出願日 平成12年5月25日(2000.5.25)

(31) 優先権主張番号 特願平11-177376

(32) 優先日 平成11年6月23日(1999.6.23)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000002130

住友電気工業株式会社

大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号

(72) 発明者 布施 敬司

大阪府大阪市此花区島屋一丁目1番3号住

友電気工業株式会社大阪製作所内

(74) 代理人 100079887

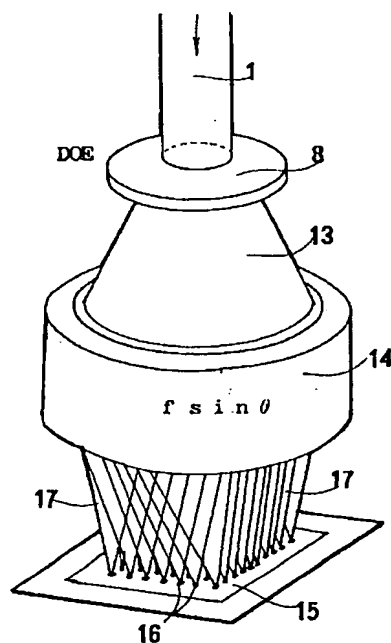
弁理士 川瀬 茂樹

(54) 【発明の名称】 レーザ穴開け加工装置

(57) 【要約】

【課題】 パッケージ、プリント基板などに多数の細い穴を一挙に穿孔すること。

【解決手段】 レーザビームをDOEによって回折させ、多数のビームを発生させ、 $f \sin \theta$ レンズによって像面に等間隔のスポットとして結像させる。ガルバノミラーと組み合わせ、ガルバノミラー方式とDOE方式を択一的に使用できるようにする。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 レーザと、一定の空間周期の同一の繰り返しパターン、或いは一定の空間周期の同一パターンを変調した繰り返しパターンを含みレーザ光を回折して多数のビームを発生する回折型光学部品と、回折型光学部品から出た多数の分岐ビームを集光する $f \sin \theta$ レンズとよりなることを特徴とするレーザ穴開け加工装置。

【請求項2】 回折型光学部品が有限の焦点距離 f を有するフレネル型であって、同一パターンを変調した繰り返しパターンを有し、繰り返しパターンが面内の位置 (x, y) における複素透過率 $t(x, y)$ によって表現され、光の波数を k 、 x 方向の空間周期を Λ_x 、 y 方向の空間周期を Λ_y 、 f を焦点距離、 m 、 l を繰り返し数以下の任意の整数 (j は虚数単位) として、 $t(x, y)$ が、

$$t(x + m\Lambda_x, y + l\Lambda_y) = t(x, y) \exp \left\{ -jk(m\Lambda_x + l\Lambda_y) / f \right\} \exp \left\{ -jk(\Lambda_x^2 m^2 + \Lambda_y^2 l^2) / 2f \right\}$$

という関係を有する事の特徴とする請求項1に記載のレーザ穴開け加工装置。

【請求項3】 回折型光学部品が無限大の焦点距離を有するフラウンホーファー型であって、同一パターンを繰り返すこととし、光の波数を k 、 x 方向の空間周期を Λ_x 、 y 方向の空間周期を Λ_y 、 f を焦点距離、 m 、 l を繰り返し数以下の任意の整数として、 $t(x, y)$ が、 $t(x + m\Lambda_x, y + l\Lambda_y) = t(x, y)$ という関係を有する事の特徴とする請求項1に記載のレーザ穴開け加工装置。

【請求項4】 複数の窓を有する回転円板の窓に複数の回折型光学部品を取り付けて、レーザビーム中に一つの回折型光学部品が位置するように置き、回転円板を回転させることによって、回折型光学部品を切り替えることができるようにした事の特徴とする請求項1～3の何れかに記載のレーザ穴開け加工装置。

【請求項5】 レーザと、レーザ光を反射する2枚以上の揺動するガルバノミラーと、一定の空間周期の同一の繰り返しパターン、或いは一定の空間周期の同一パターンを変調した繰り返しパターンを含みレーザ光を回折して多数のビームを発生する回折型光学部品と、ガルバノミラー又は回折型光学部品から出た多数の分岐ビームを集光する $f \sin \theta$ レンズと、回折型光学部品をレーザビーム光路内に挿入し、あるいは離脱させる機構とよりなる事の特徴とする請求項1～4の何れかに記載のレーザ穴開け加工装置。

【請求項6】 回折型光学部品を、2枚のガルバノミラーの中間位置に挿入または離脱させるようにした事の特徴とする請求項5に記載のレーザ穴開け加工装置。

【請求項7】 複数の窓を有する回転円板の窓に複数の回折型光学部品を取り付けて、ガルバノミラーによって反射されたビーム中に一つの回折型光学部品が位置する

ように置き、ビームを回折する回折型光学部品を切り替えることができるようにした事の特徴とする請求項6に記載のレーザ穴開け加工装置。

【請求項8】 複数の窓を有する回転円板の窓の少なくとも一つを開き窓として残し、他の窓に回折型光学部品を取り付けて、ガルバノミラーによって反射されたビーム中に一つの回折型光学部品または開き窓が位置するように置き、ビームを回折する回折型光学部品とガルバノミラーを択一的に切り替えることができるようにした事の特徴とする請求項7に記載のレーザ穴開け加工装置。

【請求項9】 回折型光学部品がフレネル型であって、複数の窓を有する回転円板の窓の少なくとも一つに、回折型光学部品と同じ焦点距離をもつレンズを設け、他の窓に回折型光学部品を取り付けて、ガルバノミラーによって反射されたビーム中に一つの回折型光学部品またはレンズが位置するように置き、ビームを回折する回折型光学部品とガルバノミラーを択一的に切り替えることができるようにした事の特徴とする請求項7に記載のレーザ穴開け加工装置。

【請求項10】 回折型光学部品をレーザ側或いはレンズ側へ移動することによって、加工すべき穴パターンの拡大、縮小を行うようにすることを特徴とする請求項1～9の何れかに記載のレーザ穴開け加工装置。

【請求項11】 レーザビームの発散角を調整する手段を回折型光学部品よりレーザに近い側に設けて、回折型光学部品へ入射するレーザビームの発散角を増減し、また回折型光学部品をレーザ側或いはレンズ側へ移動することによって、加工すべき穴パターンの拡大、縮小を行うようにすることを特徴とする請求項1～9の何れかに記載のレーザ穴開け加工装置。

【請求項12】 レーザビームの発散角調整手段としてビームエキスパンダを採用し、ビームエキスパンダのレンズ間隔を変更することによりレーザビームの発散角を調整することを特徴とする請求項11に記載のレーザ穴開け加工装置。

【請求項13】 レーザと回折型光学部品の間にピンホールマスクを設け、ピンホールマスクをレーザ側或いは回折型光学部品側へ移動して、光学系の倍率を増減し、また回折型光学部品をピンホールマスク側或いはレンズ側へ移動することによって、加工すべき穴パターンの拡大、縮小を行うようにすることを特徴とする請求項1～9の何れかに記載のレーザ穴開け加工装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 この発明は、プリント基板のレーザ穴開け加工装置に関する。電子機器のプリント基板にはICなど微小な電子回路素子が多数取り付けられる。そのために多数のピン穴が穿孔される。現在のところ細いドリルを回転下降させ、基板に押し当て一つ一つ穴を開ける加工が行われている。機械的にドリルで穴を

開ける方法は柔軟性がある。多様な穴配置の基板を少量作製するには好適である。ドリル加工は現在も主流であるが、一つ一つ穴を開けてゆくので速度が遅いという問題がある。

【0002】それとプリント基板の高密度化、多層化のために、直径の小さい穴が要求されるようになってきた。またパッケージの穴開けも微小径多穴の穴開けが必要になってくる。例えば0.15mm以下の穴径のものが必要である。このような細径のものをドリルで機械的に穿孔するのは難しい。ドリル強度に問題があるからである。そのような細径の穴を穿孔するものとして、レーザビームによって光学的に穿孔するというのが有力な候補となる。本発明は、そのような要求に応え細径の穴でも適用でき、少品種大量生産むきの高速の穴開け加工装置を提供しようとするものである。

【0003】

【従来の技術】ドリルによる穿孔より高能率の方法としてレーザとガルバノミラーとレンズを組み合わせた方法が提案されている。炭酸ガスレーザのパルス光をガルバノミラーで反射して、レンズで集光しプリント基板にあて熱によって瞬時に穴を開けるものである。二つの異なる軸の廻りに揺動する二つのミラーを使ってレーザビームを直交する二方向に振ってプリント基板上をレーザビームが走査するようにする。レーザがパルス光を発生するから所定の部位に非連続的な穴穿孔を行う事ができるのである。また、光によって基板を焼き切るのだから細い穴を開けることができる。ドリルによるよりも高速でより細径の穴を多数開けることができる。将来性のある新規な穿孔方法である。

【0004】集光の為にレンズを問題にする。通常のレンズは、平行光をレンズから焦点距離だけ離れた平面の像面に結像させる作用がある。レンズの中心を通る光は曲がらずに像面に到達して結像する。レンズ光軸に対して θ だけ傾斜したビームは像面の中心から $f \tan \theta$ だけ離れたところに像を作る。像面での中心からの距離が $f \tan \theta$ であるから、ここでは仮に $f \tan \theta$ レンズと表現することにする。

【0005】ガルバノミラーによって1本のビームをx方向、y方向に走査する場合、振れの角度が一定になる。穴の分布も一定のピッチを保つので、振れ角 θ とそのビームが像面で作る像点の中心からの距離が比例する必要がある。つまり、レンズへの入射角 θ と焦点距離 f の積 $f \theta$ に等しい点に像位置がくるというレンズが必要である。これは $f \theta$ レンズという。これは通常のレンズとは違うので、特殊な形状をしており特別の設計法が要求される。

【0006】もう一つはビームが基板に垂直でないといけないという条件が課せられる。垂直に基板に入射して初めて基板に直交する穴を開けることができる。入射ビームがレンズ光軸に対して傾いており、レンズ非中心部

を通過するのにそのレンズから出たビームは基板に垂直でなければならない。これは通常のレンズではかなり難しい条件である。そのように傾斜したビームがレンズ非中心位置に入射してもレンズを出るときは垂直ビームになる、という性質をテレセントリック性と呼ぶ。ガルバノミラー方式の場合、集光レンズは $f \theta$ 性とテレセントリック性が必要である。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】プリント基板、ICパッケージ等のレーザ穴あけ加工に於いて、新技術であるガルバノミラーと $f \theta$ レンズを使えば、1秒間に約500個の穴を穿つ事ができるという。図1にその概念図を示す。レーザビーム1がx軸スキャンミラー2によって反射される。y軸スキャンミラー3によってさらに反射される。x軸スキャンミラーは軸周りに揺動する。だから反射ビームも左右に揺動する。y軸スキャンミラー3も軸周りに揺動し、反射ビームは軸直角方向に揺動する。

【0008】2重に反射されたビームはレンズ4の上を縦横に走査する。レンズ4によって集光されたビームがプリント基板5に照射される。ビームがx軸、y軸方向に走査されレーザがパルス光を出すので、縦横に並ぶ多数の穴6を素晴らしい速度で穿孔できる。ドリル機械穿孔に比べて格段の進歩である。ガルバノメータ、ガルバノミラーも実用的な物が製造されているし、赤外光用のレンズも設計されており実用化が急速に進められている。

【0009】しかし、それよりもさらに高速で穴を穿つという要求が出されている。例えば1秒間に数千個以上の穴を一挙に穿孔したいというものである。プリント基板に限らずパッケージの穴穿孔などの用途もある。これほど高速度の穿孔の要求はこれまでの技術では対応できそうもない。ガルバノミラーによって機械的にビームを振っているのではとても間に合わない。

【0010】一本のレーザビームを所望の空間分布をもつ多数のビームに分割するため回折型光学部品(DOE)というものが提案されている。図3、4、5によってDOE8を説明する。図3は全体の平面図、図4は一つの単位パラメータの図、図5は図4のL-L断面図である。DOEは対象光に対し透明の板を縦横に並ぶ多数の単位パターン9(図4)に分割し、単位パターン9をさらに多数の画素10に分割し、画素10の厚みを 2μ 通り($m=1, 2, 3, \dots$)に変える。これはDOEを透過する光の1波長分の厚みを 2μ 通りに分割するものである。従ってこの厚み分布は位相分布を成しており透過する光を位相変調させる。図5は2段階に($m=1$)厚みを変える例を示す。厚い画素11と薄い画素12がある。2種の画素はこの波長の光の半波長分の厚みの差(位相差)がある。この分布が回折の分布を決める。繰り返し単位パターンの画素分布によりレーザビームを回

折させ、所望の分布の多数のビームを発生させるものである。

【0011】多数の単位パターン9は同一の画素構成を持つ。単位パターン9の1辺が周期 Λ になる。回折を起こさせるために繰り返しが不可欠であり、単位パターンの繰り返しが必要である。周期 Λ は回折角の広がりを決める。 Λ が大きいと回折角が小さい。 Λ が小さいと回折角が大きくなる。

【0012】DOEの単位パターン内の位相（つまり厚み）の分布が制御変数になる。位相差を二次元的に分布させることによって、二次元的な広がりをもつ回折ビームを作り出すことができる。単位パターンが正方形の場合（ $\Lambda \times \Lambda$ ）、 x 、 y の両方向へ回折されるビームの1次当たりの角度は同じにできるし、長方形の場合（ $\Lambda_x \times \Lambda_y$ ）それらを異なるものにできる。DOEの画素サイズや厚み分布（位相分布）を決めることによって任意の回折光分布を得る事ができる。DOEは、一挙にM本のビームを作り出すので、ガルバノミラーのように動くのではなく、静止しているにも拘らず、瞬時に多数の穴を穿孔することができる。レーザビームをDOEに入れ多数の分割ビームを作り出す。これをレンズによって集光してからプリント基板、パッケージに照射する。 *

*【0013】通常のレンズは $f \tan \theta$ レンズである。ガルバノミラーの場合、 $f \tan \theta$ レンズは不適であり、 $f \theta$ レンズが用いられていた。ガルバノミラーは揺動角のピッチ（最小単位）が決まっており、揺動角は最小単位 Δ の整数倍 $m\Delta$ である。だから等間隔に並ぶ穴を穿つには、レンズは $f \theta$ レンズが最適なのである。

【0014】 $f \theta$ レンズは、 $f \theta$ 性、テレセントリック性と、回折限界の集光を実現するために5枚、4枚などのレンズを組み合わせる。最低でも2枚のレンズが必要である。図2に2枚組の $f \theta$ レンズの例を示す。第1のレンズL1と第2のレンズL2を組み合わせている。L1の入射光側の面がS1、出射側の面がS2である。L2の前面がS3、後面がS4である。L1は球面レンズである。L2は前面S3が球面で後面S4が非球面である。レンズより後方に中心を持つ球面の場合に曲率半径を正と定義する。非球面の面高さ $Z(r)$ は次のように半径 r の関数として与えられる。パラメータが c 、 k 、 α_j である。 j は1から適当な自然数 s までである。所定の性能が得られないときは j の上限 s を増やしてゆく。ここでは $s=5$ となっている。

【0015】

【数1】

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1 + \{1 - (1+k)c^2r^2\}^{\frac{1}{2}}} + \sum_{j=1}^s \alpha_j r^{2j} \quad (1)$$

【0016】

※ ※【表1】

$f \theta$ レンズのデータ

レンズ番号	面番号	曲率半径 (mm)	厚み、間隔 (mm)	屈折率
L1	S1	-32.473	6.184	2.403
	S2	-37.790	62.114	
L2	S3	-3848.615	11.702	2.403
	S4	表2	158.588	

【0017】厚みというのはレンズの厚みとレンズ間の間隔、レンズと像面の間隔を含む概念である。62.114mmというのはL1レンズのS2面とL2レンズのS3面の間隔である。158.588mmはL2のS4面と像面Iの間隔である。炭酸ガスレーザの光を用いる★40

★(10.6 μ m)ので赤外光に対して透明なZnSe多結晶を基材としている。屈折率はこの波長の光に対するものである。

【0018】

【表2】

$f \theta$ レンズの非球面データ

面番号	S4	非球面係数	
1/c (mm)	-169.837	α_2	1.217×10^{-9}
k	-1.060	α_3	-2.529×10^{-12}
		α_4	1.383×10^{-15}
		α_5	-2.550×10^{-19}

【0019】DOEからの回折光を $f \theta$ レンズによって像面I上に集光させる。DOEにより分割された各ビームが像面I上の各位置へ収束する。その位置は、分割さ

れた各ビームの傾斜角（回折角）により決まる。しかし、本発明者はDOEには $f \theta$ レンズも必ずしも適切でないということに気付いた。

【0020】その理由について説明する。DOEは一定周期で画素を定義し画素の高さ(厚み)により、透過光の位相を変調することによって回折光を作り出す。無秩序の厚み配列によって回折させるのではなくて、一定の周期性を持った配列となるから、これによってある種の制限が課される。

【0021】平行光をDOEに垂直入射させることを考える。分岐した多数の回折光も全て平行光である。そのままでは収束しないので、DOEの後ろにレンズを置

$$\Lambda \sin \theta_n = n\lambda$$

【0023】である。n次回折光の傾斜角(回折角) θ_n は、

【0024】

$$\theta_n = \sin^{-1} (n\lambda / \Lambda) \quad (3) \quad *$$

$$h_n = f \tan \{ \sin^{-1} (n\lambda / \Lambda) \} \quad (4)$$

【0027】(2) ガルバノミラーに使われるf θ レン★ ★ズの場合

$$h_n = f \sin^{-1} (n\lambda / \Lambda) \quad (5)$$

【0028】いずれにしても、回折次数nと画像面での ☆らずれるのか?

中心・像点距離 h_n が線形でない。どれほど線形関係か ☆ 【0029】

$$\tan (\sin^{-1} x) = x + (x^3 / 2) + (3x^5 / 8) \cdots \quad (6)$$

【0030】

$$\sin^{-1} x = x + (x^3 / 6) + (3x^5 / 40) \cdots \quad (7)$$

【0031】線形関係からのずれは、xの3乗以上の項から現れる。だからかなりxが大きくなって初めて大きく顕在化する。x = $n\lambda / \Lambda$ であるが、 Λ が比較的大きく、nがあまり大きくなければ、xが小さいので線形からのズレは無視できよう。しかし、 Λ が小さい、或いはnが大きい(回折次数が高い)と、回折角 θ が大きくなり、線形からのズレを無視できなくなる。

【0032】2種類のレンズを比べると、f θ レンズの 30 方がf $\tan \theta$ よりずれが小さく約1/3である。f θ が良いといっても最良ではない。ガルバノミラー方式で ◆

$$h_n = f \sin \{ \sin^{-1} (n\lambda / \Lambda) \} \quad (8)$$

$$= f n \lambda / \Lambda \quad (9)$$

【0034】となる。もし製作できれば、これが最適のレンズである。もしこのレンズが作製できれば、隣接する回折スポットの距離 $d_n = h_n - h_{n-1}$ は次数にかかわらず一定になる。

$$【0035】d_n = f \lambda / \Lambda \quad (10)$$

【0036】以上で3つのレンズについて回折パターン 40 の距離の線形性を考察した。近軸光線だけを扱うならば、f $\tan \theta$ レンズ、f θ レンズ、f $\sin \theta$ レンズの何れであってもスポットの位置は殆どずれない。 θ が十分に小さいと、近似式

$$【0037】\sin \theta_n = \tan \theta_n = \theta_n \quad (11)$$

【0038】が成り立つからである。例えば $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ の炭酸ガスレーザを使い、焦点距離fをf = 127mm、 $\Lambda = 2.688\text{mm}$ とすると、 $d = 0.5\text{mm}$ であるが、その場合7次回折光でも $\theta_7 = 1.6^\circ$ である。十分に近軸光線近似が有効である。このように回折

* き、後ろ側焦点位置に各次数の回折光を集光させる。平行ビームだからDOEの後ろfの位置に全ての次数のビームが同じ面に収束する。レーザビームがDOEを通り分岐回折光が生ずる。これがレンズLによって集光され像面Iに光のスポットを作る。レーザ光の波長を λ 、DOEのパターン周期を Λ とする。回折の次数をnとする。n次回折ビームの光軸となす角度を θ_n とする。回折条件式は

$$【0022】$$

$$(2)$$

※ 【0025】によって与えられる。その角度をもってレンズに入射するのであるから、レンズ背後の画像面の中心からn次回折像点までの距離 h_n は次のようになる。

【0026】(1) 通常のf $\tan \theta$ レンズの場合

☆らずれるのか?

【0029】

◆ 開発されたf θ レンズをそのまま流用するのはなお最適とは言えない。最も良いのは、レンズ入射角 θ のビームを像面において、中心から像点までの距離 h_n が $\sin \theta_n$ に比例するようにするレンズである。これまでの表記の方法にならっていえば「f $\sin \theta$ 」とでも表現することができよう。もしもそのようなレンズが製作できたとすれば、次のような好都合な関係が成り立つはずである。

【0033】(3) 本発明で初めて提案されるべきf $\sin \theta$ レンズを使ったと仮定した場合

$$(8)$$

$$(9)$$

角が小さい場合はいいのであるが、より大きくなると最早通常のf $\tan \theta$ レンズは誤差が大きくなりすぎる。f θ レンズでもやはり誤差が大きい。高次の回折まで利用でき回折角が大きい場合にも有効な装置を提供することが本発明の目的である。

【0039】

【課題を解決するための手段】本発明のレーザ穴開け加工装置は、レーザと、一定の空間周期の同一の繰返しパターン、或いは一定の空間周期の同一パターンを変調した繰返しパターンを含みレーザ光を回折して多数のビームを発生する回折型光学部品と、回折型光学部品から出た多数の分岐ビームを集光するf $\sin \theta$ レンズとよりなる。

【0040】つまり、パワーの大きいレーザと周期的なパターンを有し、レーザ光を回折することにより多数の分割されたビームを生成する回折型光学部品と、回折型

光学部品から出た分割ビームを集光する $f \sin \theta$ レンズとよりなり、プリント基板や IC パッケージに多数の穴を一挙に穿孔するものである。

【0041】図 11 に概略の構成を示す。レーザからの平行入射ビーム 1 が DOE 8 によって 2 次元的な広がりをもつ回折ビーム 13 に分割される。これは平行ビームである。平行回折ビームは集光レンズ 14 によって集光分割ビーム 17 となる。像面に置かれたパッケージ 15 に集光分割ビーム 17 を照射し多数の穴 16 を一挙に穿孔している。集光レンズとして $f \sin \theta$ を使うということが重要である。 $f \sin \theta$ というのはここで初めて提案するが、レンズに θ の傾斜角で入射したビームが像面において中心から $f \sin \theta$ の位置に結像するような性質をもったレンズである。同じ様な定義を用いれば通常のレンズは $f \tan \theta$ レンズ、ガルバノミラーに最適のミラーは $f \theta$ レンズと呼ぶことができる。

【0042】回折型光学部品によってレーザビームを回折すると多数の分割ビームを一挙に作ることができる。それはまことに便利な性質である。しかし、回折型光学部品は一定不変のものであるから、一つの回折型光学部品によって作ることのできる分割ビームのパターンは固定されてしまう。回折型光学部品は生産性は申し分ないのであるが柔軟性がない。それは困ったことである。幾つか異なるパターンの穴を穿ちたいという要望には充分に応えることができない。

【0043】なんとか汎用性柔軟性を与えたいものである。そこで本発明者は、複数の異なる回折型光学部品を作製し複数の窓を有する回転円板に取り付けて円板を廻すことによって瞬時に回折型光学部品を交換できるような改良を思いついた。G 個の窓をもつ回転円板に 1 個の回折型光学部品を取付ける ($G > 1$) とすれば、1 種類の穴パターンを高能率で易々と穿つことができる。

【0044】もう一つ柔軟性を与えるため本発明者は、ガルバノミラーと回折型光学部品を組合わせることを考えた。ガルバノミラーは機械的なドリル穿孔よりもずっと高速で穴を穿つ事ができる。しかもガルバノミラー方式はそれ自身回折型光学部品よりも優れた柔軟性がある。それは自由度があるからである。二つのミラーを揺動させるのであるが、揺動の速度や振幅が調整可能な変数となりうる。パルスレーザのパルス間隔も変数となりうる。そのような変数をかえることによって、空間周期の異なる穴パターンを穿つようにすることができる。また基板の大小にも対応する事ができる。ガルバノミラーと回折型光学部品を組み合わせたハイブリッド方式にすると広範な自由度を獲得することができる。どのような穴配列にも対応できる柔軟性を得ることができる。

【0045】ハイブリッド方式の本発明のレーザ穴開け加工装置は、レーザと、レーザ光を反射する 2 枚以上の揺動するガルバノミラーと、一定の空間周期の同一の繰り返しパターン、或いは一定の空間周期の同一パターン

を変調した繰り返しパターンを含みレーザ光を回折して多数のビームを発生する回折型光学部品と、ガルバノミラー又は回折型光学部品から出た多数の分岐ビームを集光する $f \sin \theta$ レンズと、回折型光学部品をレーザビーム光路内に挿入し、あるいは離脱させる機構とよりなる。ガルバノミラーを使うときは光路から回折型光学部品を離脱させる。回折型光学部品を使うときはガルバノミラーは中立位置に停止させておく。

【0046】ハイブリッド型の場合、ビーム系のどこへ回折型光学部品を挿入してもよい。たとえば、2 枚のガルバノミラーの中間位置に挿入または離脱させるようにする。

【0047】あるいは、複数の窓を有する回転円板の窓に複数の回折型光学部品を取り付けてガルバノミラーによって反射されたビーム中に一つの回折型光学部品が位置するように置き、円板を回転させビームを回折する回折型光学部品を切り替えることができるようにする。

【0048】さらには、複数の窓を有する回転円板の窓の少なくとも一つを開き窓として残し、他の窓に回折型光学部品を取り付けてガルバノミラーによって反射されたビーム中に一つの回折型光学部品または開き窓が位置するように置き、ビームを回折する回折型光学部品とガルバノミラーを択一的に切り替えるようにもすることができる。図 12 に概略構成を示す。ガルバノミラーの x 方向スキャンミラー 2 と、y 方向スキャンミラー 3 の中間のビーム 18 の途中に回転円板 19 を設けている。回転円板 19 は周囲にいくつかの窓 20 が設けられる。窓 20 には異なる DOE 8a、8b、8c が取り付けられる。窓 20 のうちいくつかは開口のまま残される。これはガルバノミラーによってビームを揺動する場合のためのものである。DOE (回折型光学部品) 8 を使う場合は、ガルバノミラーは中立位置に停止させる。

【0049】或いはより進んで、レーザビームの発散角を調整する手段を回折型光学部品よりレーザに近い側に設けて、回折型光学部品へ入射するレーザビームを増減し、また回折型光学部品をレーザ側或いはレンズ側へ移動することによって、加工すべき穴パターンの拡大、縮小を行うようにする事もできる。レーザビームの発散角を調整する手段としては、レンズやビームエキスパンダを採用すれば良い。比較的長い負の焦点距離を有するレンズを用いれば、入射ビームの発散角を増大することができる。或いは正の焦点距離のレンズであれば、発散角を減少させることができる。さらには収束光とすることもできる。ビームエキスパンダは 2 枚以上のレンズよりなるので、その間隔を変更することによりレーザビームの発散角を増減させることが可能である。

【0050】ガルバノミラーの柔軟性と、回折型光学部品の高能率を生かすといっても、単純に従来のガルバノミラーと、回折型光学部品とを組み合わせるといった訳にはゆかない。レンズが違うからである。既に説明したよ

うに、ガルバノミラーの場合は、ミラーを左右に揺動させるので時間的な角度変化が一定であるものを作り易い。一定周期の穴を穿とうとすると θ に距離が比例する様な $f\theta$ レンズが最適である。ところが、回折型光学部品の場合の集光レンズは、本発明で初めてその必要性を指摘したように、 $f\sin\theta$ が最適なのである。ガルバノミラーと回折型光学部品に共通に好都合のレンズというのは残念ながら存在しない。

【0051】そこで本発明は、回折型光学部品に最適の $f\sin\theta$ レンズを集光レンズとして採用する。回折型光学部品には柔軟性がないが、ガルバノミラーの場合はいろんな調整可能なパラメータがある。揺動の角加速度を一定とすると、 $f\theta$ レンズが最適であるが、揺動の角加速度を一定でなくて、 $\cos\theta$ の比でわずかに増減させる。これは可能である。正弦波に高調波を加えれば良いのである。揺動角速度を θ が0の付近で速く、0から離れるにしたがって遅くすれば、 $f\sin\theta$ レンズによって、穴を等分布で穿孔する事ができる。もとより θ が小さい時には $f\theta$ と $f\sin\theta$ の違いはわずかであるから、高調波成分は僅かでよい。また像面の特定位置を狙う場合には、 $f\theta$ レンズの場合よりも少し大きめの角度でガルバノミラーを振れば良い。 $f\theta$ レンズの場合のガルバノミラーの振り角を α とするならば、 $f\sin\theta$ レンズでは $\alpha' = \sin^{-1}\alpha$ の振り角を与える。このようにガルバノミラーの振り角や角速度を制御すれば $f\sin\theta$ レンズでも高精度のスキャニングが可能である。ここまで述べた回折型光学部品というのはビーム分岐の機能のみを有するフラウンホーファー型のものである。しかし有限の焦点距離を有するフレネル型回折型光学部品によっても本発明の装置を構成することができる。フレネル型DOEの利点は、0次光を遮断できるということと、拡大縮小の幅が広いということである。

【0052】

【発明の実施の形態】 $f\sin\theta$ レンズの設計方法について説明する。回折型光学部品からの各次数の回折光を考慮するため、レンズの手前に回折格子を置く。回折格子の格子周期を Λ とする。波長 λ の単色光が入射し回折されるとする。光線追跡では、入射角 θ_i で回折格子に入射した光線が、回折格子に入射し n 次回折して偏向して回折角 θ_n の方向に出射したとすると、次の式が成り立つ。 n 次回折光は回折型光学部品によって波長の n 倍の光路差が与えられたものである。だから θ_i と θ_n の間に次のような簡明な関係がある。

【0053】

$$\Lambda(\sin\theta_n - \sin\theta_i) = n\lambda \quad (12)$$

【0054】特に垂直入射の場合は、

$$\Lambda\sin\theta_n = n\lambda \quad (13)$$

【0055】となる。

*

$$E_A = \sum \sum w_n w_j (\Delta x_{n,j}^2 + \Delta y_{n,j}^2) \quad (14)$$

【0064】この評価関数を最小化するように変数を変

*【0057】レンズ設計のために、評価関数による方法をここでは採用する。評価関数による光学部品の設計方法自体は公知である。いくつかの変数を選択し、設計された部品について光線追跡して変数の実際の値を計算し、その誤差の2乗を求め、これを積算したものが評価関数である。評価関数が大きいということは誤差が大きいということで、評価関数を減少させる方向に変数の値を変更してゆきやがて最適の変数の組を見出す、というものである。

10 【0058】レンズ設計のための評価関数として、例えば光線収差を採用する。もちろん、波面収差など他の光学的誤差を評価関数に採用しても良い。理想的には像面で1点に収斂すべき光線群が、レンズに収差があると、点々とばらついて像面に到達する。そこで各光線の像面でのズレ(距離)の二乗の和をとり、それを評価関数とする。像面での光線のズレが光線収差であり、誤差二乗和をとるから光線収差を評価関数として採用するといっているのである。

20 【0059】図9は、入射瞳(entrance pupil)上の光線の分布を示す例である。ここでは、入射瞳は、レンズに入射する光の断面と考えることができる。入射瞳の中の一点は、一本の光線を意味する。任意の瞳上の位置(P_x, P_y)に好みの数の光線を取って良い。

(P_x, P_y)は瞳上の座標を表す。瞳の大きさは正規化してあり、半径1の円によって表している。計算の精度を上げるためには、光線の本数は多く、瞳全体に広く分布させる方が良い。しかし計算量を減らし計算を迅速に実行するには、光線は少ない方が好都合である。図9は18本の光線を取る例である。

30 【0060】瞳の中心から放射状に伸びる6本の直線を取り(P_x 軸となす角度が0度、60度、120度、180度、240度、300度の方向)、さらに大きさの異なる3つの輪を取る。3つの輪の半径は、それぞれ $R = 0.3357, 0.7071, 0.9420$ である。これらの6本の放射線と3つの輪の交点は18ある。18点に光線を取る事にする。各光線の重みは、黒丸(12本)が $w_j = 0.048481$ 、白黒丸(6本)が $w_j = 0.07757$ とする。

40 【0061】各光線が像面でどのような位置にばらついて到達するかを計算すると、その位置ズレ $\Delta x, \Delta y$ が求まる。 $\Delta x, \Delta y$ は全光線の重心位置からのズレの x 成分と y 成分である。

【0062】各光線を j ($=1, 2, \dots, 18$)、回折次数 n ($=0, 1, 2, 3$)によって示し、光線毎の重み w_j と各回折次数への重み w_n を掛けて光線収差に関する評価関数 E_A を得る。

【0063】

動させる。

【0065】上記の評価関数は、レンズによる光の収斂特性を評価することができる。しかしそれだけでは不十分である。 $f \sin \theta$ レンズの設計では、その他に重要な特性として、 $f \sin \theta$ の歪曲特性、像側のテレセントリック性がある。歪曲特性、テレセントリック性をも評価できるものである必要がある。歪曲特性、テレセントリック性を評価可能とすることによって、各回折次数に対応する焦点の位置精度や、その集光の垂直性を改善するような最適化を図ることができる。

【0066】例えば、 $f \sin \theta$ 性を評価する為に以下のような評価関数を採用する。図10のように回折格子に適当な周期 Λ を与え、0次、1次、2次、3次、4次、5次の5つの回折次数を取るならば、像面上での各焦点の位置 h_n ($n=0, 1, 2, 3, 4, 5$) は、その時点での光学系のパラメータについて光線追跡することにより計算によって求められる。主光線の座標を決めれば良いのである。回折格子の周期 Λ とレンズの焦点距離 f から、各焦点位置の理想値 g_n は、

$$【0067】 g_n = n \lambda f / \Lambda \quad (15)$$

【0068】によって与えられる（ここでは物点はレンズ前方無限遠にあるものとしている）。これを目標値として、 $f \sin \theta$ を評価するための評価関数 E_D を

$$【0069】 E_D = \sum (g_n - h_n)^2 \quad (16)$$

【0070】によって与えることができる。さらに、周期 Λ を大きくし、回折次数を5より多く設定し、詳細に*

$$e_2 = \alpha (t - 3.5)^2 + \beta (t - 15)^2 \quad (19)$$

【0078】というような評価関数を取る事ができる。但し係数 α は、 $t > 3.5$ mmのとき $\alpha = 0$ であり、 $t \leq 3.5$ mmのとき $\alpha = 1$ という値を持つものとする。同様に、係数 β は $t < 15$ mmの時 $\beta = 0$ 、 $t \geq 15$ mmのとき $\beta = 1$ の値を取るものとする。だから t が3.5 mm～15 mmの時 $e_2 = 0$ となる。 t がその範囲に無いときに t をこの範囲に呼び込むための評価関数である。

【0079】このような拘束条件を与える評価関数 e (e_1, e_2, \dots) を適当な重み w を掛けて足し合わ*

$$E = W_A E_A + W_D E_D + W_T E_T + W_C E_C \quad (21)$$

【0084】となる。これが全体の評価関数である。重み W_A, W_D, W_T, W_C は、 E_A, E_D, E_T, E_C の評価関数をバランス良く最小化させるように決める。ここでは単純に $W_A = W_D = W_C = W_T = 1$ において、

【0085】 $E = E_A + E_D + E_T + E_C$ (22)

【0086】とする。この全体の評価関数を最小化するように変数の最適化計算を行う。最適解を求めることによって、各回折次数での光線収差、 $f \sin \theta$ 、テレセントリック性、拘束条件のそれぞれについて最も良好となるパラメータの値を求める事ができる。

【0087】【テレセントリックからずれた場合】図6のようにDOEと $f \sin \theta$ レンズL、像面Iがあると

* $f \sin \theta$ 性を評価することもできる。

【0071】またテレセントリック性については、各回折次数において、主光線を追跡し、像面に入射する角度 Θ_n を求めることができる。テレセントリック性というのはこれが0に近いということを要求するので、入射角度の2乗が誤差を与えると考えることができる。評価関数 E_T として

$$【0072】 E_T = \sum (\Theta_n)^2 \quad (17)$$

【0073】を採用し、テレセントリック性を評価関数に含ませる。式(14)とともに、式(16)、(17)の評価関数をも最小化するように変数の値を最適化する。これらが設計の前提条件である。具体的に好ましい焦点距離、レンズ厚みなどを与える事によって、より具体的な評価関数を決めることができる。

【0074】焦点距離 f を127 mmと決める場合、評価関数として、

$$【0075】 e_1 = (f - 127)^2 \quad (18)$$

【0076】を取る。この評価関数を含ませることによって焦点距離 f を127 mmに近い値にする事ができる。レンズ厚みは焦点距離のように一義的な目標を定めることが難しい。ある範囲を指定してその範囲にある、というようにする。たとえば、レンズ厚み t が3.5 mm以上15 mm以下としたい場合は、

$$【0077】$$

※せる事により全ての拘束条件に関する評価関数 E_C に纏める。

$$【0080】 E_C = \sum w_C e_C \quad (20)$$

【0081】となる。

【0082】以上に述べた4つの評価関数(14)、(16)、(17)、(20)の総和をとって評価関数を完成させる。適当な重み W_A, W_D, W_T, W_C を掛けて総和を取る。

$$【0083】$$

れた各ビームは、主光線のみを見ると、レンズによって平行光線にコリメートされ、像面に垂直に当たることになる。その場合簡単にテレセントリック性があるという。レンズと前焦点の距離は f である。後ろ焦点とレンズとの距離も f である。レンズと像面の距離が b だとする。レーザを充分遠方の点光源からの光と考えて、その光源からレンズまでの距離を a とする。DOEが前焦点にあればテレセントリック性があるが、これよりレーザ側に Δ だけずれたとする。その場合に像面での回折ビームの大きさを考える。図7はDOEが前焦点から Δ だけ前方にずれた状態を示している。

【0088】DOEとレンズの距離を a' ($= \Delta + f$) とする。DOEから光軸に対し θ で出たビームがレンズ

によって屈折して光軸と b' の位置で交差するとする。交差角を θ' とする。 h をそのビームが後ろ焦点面と交差する点での高さとする。

【0089】

$$\tan \theta' = h / (b' - f) \quad (23)$$

【0090】薄肉レンズの公式から

【0091】

$$(\Delta + f)^{-1} + b'^{-1} = f^{-1} \quad (24)$$

【0092】が成り立つ。これから

$$\Delta (b' - f) = f^2 \quad (25)$$

である。

【0094】

$$\tan \theta' = \Delta h / f^2 \quad (26)$$

【0095】テレセントリック性がなくて、DOEが前焦点からずれているので、像面での高さ h' がテレセントリック性のある場合の高さ h からずれる。そのズレを計算するのが目的である。後ろ焦点面とビームの交差点は、DOEが前焦点にあるときの後ろ焦点面とビームの交差点と同じである。この点は少し分かりにくい、回折部品から同じ角度方向に出た光は後ろ焦点面を交差する時全て同じ点を通るのである。だから高さ h の点で後*

$$d_j' = d_j \{1 - (b - f) \Delta / f^2\} \quad (29)$$

【0101】これはDOEを前焦点($\Delta = 0$)からレーザ側にずらすと穴間隔を減らすことができ、レンズ側にずらすと穴間隔を増やすことができるということを意味している。

【0102】レーザビームの発散角は一般にはあまり大きくないので、 a が非常に大きくなり、 b が f に近い値となる。そのため、式(29)の右辺の $(b - f)$ が0に近くなり、 Δ を変化させてもあまり d_j' が変化しない。その場合には、レーザビームの発散角を大きくすることが必要になる。発散角を大きくしてやれば、 a が減少し、 $(b - f)$ が大きくなるため、 Δ を変化させ d_j' を調整することができる。

【0103】レーザビームの発散角を調整する手段として単純なのはレンズである。長い負の焦点距離を有するレンズを用いれば、入射ビームの発散角を増大させることができる。逆に、正の焦点距離のレンズであれば、発散角を減少させることができる。さらには、収束光とすることも可能である。

【0104】他の手段としては、ビームエキスパンダもある。ビームエキスパンダは、例えば、ガリレオ式のもの、負の焦点距離のレンズと正の焦点距離のレンズの2枚より成る。図13にビームエキスパンダの一つの例を示す。負レンズの焦点距離を $-f_1$ 、正レンズの焦点距離を $+f_2$ とし、レンズ間距離を $d = (f_2 - f_1)$ とする。入射した平行ビームの径が f_2 / f_1 の比率で拡大されて、平行ビームが射出される。

【0105】このとき、 d を $(f_2 - f_1)$ より小さくすると、射出ビームは発散ビームとなる(図14)。逆

*ろ焦点面を通るのである。これから像面が $(b - f)$ だけ後ろにずれていてビーム角度が θ' であるから、

【0096】

$$h' = h - (b - f) \tan \theta' \quad (27)$$

となる。

【0097】

$$h' = h \{1 - (b - f) \Delta / f^2\} \quad (28)$$

【0098】である。これはDOEを前焦点から Δ だけ物点側に移動させたときに、像の大きさ h' が、DOEを焦点に置いたとき($\Delta = 0$)の像の大きさ h よりも小さくなるということを意味する。反対にDOEを前焦点よりもレンズ側に接近させると像 h' が大きくなる。

【0099】上では主光線のみを考えたが、回折角 θ をもってDOEから出た光束を考えるならば、 h や h' はDOEが前焦点にある場合と、前焦点から Δ だけ移動した場合のスポットの位置を表している。 j 次回折光の角度を θ_j 、 $j + 1$ 次回折光の角度を θ_{j+1} として、スポットの間隔 d_j 自体も(28)とまったく同じ動きをする。

20 【0100】

に d を $(f_2 - f_1)$ より大きくすると収束ビームとなる(図15)。このように、レンズ間隔を変更する事により、レーザビームの発散角を増減することが可能である。入射ビームの半径を R 、レンズ間距離の変化分を $\delta = d - (f_2 - f_1)$ とすると、射出ビームの発散角 Θ (半角)は

$$\tan \Theta = R \delta / f_1 f_2 \quad (30)$$

30 によって表される。

【0106】例えば、 $R = 5 \text{ mm}$ 、 $f_1 = 50 \text{ mm}$ 、 $f_2 = 100 \text{ mm}$ とすれば、 $d = 50 \text{ mm}$ で $f_2 / f_1 = 2$ 倍のビームエキスパンダとなり、

$$\tan \Theta = 0.001 \times \delta \quad (31)$$

【0107】となる。従って、 δ を $\pm 10 \text{ mm}$ の範囲で調整すれば、ビームの発散角を $\pm 10 \text{ mrad}$ の範囲で変化させることができる。ビームエキスパンダの出口からレンズ迄の距離を 100 mm とすると、 a が -1000 mm 以下か 1000 mm 以上となり、 $f = 100 \text{ mm}$ とすると、 $(b - f)$ は $-9.1 \text{ mm} \sim 11.1 \text{ mm}$ となる。従って、 $\Delta = \pm 10 \text{ mm}$ の範囲でDOEの位置を調整するとすれば、式(29)より、スポット間隔を約1%変化させることができるようになる。このときテレセントリック性は、 $h < 25 \text{ mm}$ とすると、式(26)より $\tan \theta' < 0.025$ となり、おおよそ ± 1.4 度以下で十分にテレセントリック性を維持している。

【0108】またもうひとつの方法として、マスク転写光学系とする方法もある。図16のように、レーザビームをピンホールマスクに入射し、その転写像をレンズにより像面Iに結像する。この場合、 a はピンホールマス

クからレンズまでの距離となる。この光学系の転写倍率は $M = b/a$ となる。だからピンホール径の M 倍の大きさでスポットが像面に形成される。

【0109】同様に、レンズの前側焦点にDOEを置けば、分岐された各ビームがレンズで集光されて、既定の*

$$d_j' = d_j (1 - M\Delta/f)$$

【0110】例えば、 $a = 1100\text{mm}$ 、 $f = 100\text{mm}$ の場合、 $M = 0.1$ となるので、ピンホールの直径を $\phi 1\text{mm}$ に選べば、 $\phi 0.1\text{mm}$ の穴を開けることができる。このとき、 Δ を $\pm 10\text{mm}$ で調整すれば、スポットの間隔を $\pm 1\%$ の範囲で調整することができる。また Δ を 10mm で固定し、 a を $1000 \sim 1200\text{mm}$ の範囲で移動すると、倍率 M が $0.11 \sim 0.09$ で変化するので、スポットの間隔をおよそ $\pm 1\%$ の範囲で調整することができる。このとき、穴の大きさが $\pm 1\%$ 程度変わってしまう。それを避けたいというのであれば、ピンホールの穴径を調整すれば良い。

【0111】回折型光学部品には様々な機能を持たせられるが、これまでに述べた回折型光学部品は入射ビームを多数に分岐する機能を持つものであった。分岐するのみなので、入射ビームが平行光であれば分岐された各ビームも平行光であり、入射ビームが発散光であれば分岐ビームも同じ発散角を有する発散光である。そのままでは各分岐ビームを像面に集光することができないのでレンズを用いている。つまり、回折型光学部品は分岐の機能を、レンズは集光機能をそれぞれ分担しているのである。このような回折型光学部品の光学特性（像面の強度分布などの分岐特性）は、回折でも特にフラウンホーファ回折という理論で記述可能であり、DOEの位相分布と像面上の振幅分布がフーリエ変換で表されるという重要な関係が成り立つ。そのため、この種のDOEをフラウンホーファ型、あるいはフーリエ変換型などと言う。

【0112】ところが分岐の機能のみを有するフラウンホーファ型（フーリエ変換型）DOEには二つの欠点がある。それについて簡単に説明する。一つは0次光の問題である。これはDOEで分岐されないで入射ビームと同一方向に進む光である。0次回折光（ $n=0$ ）とも言う。設計段階で問題なくとも、製造されたDOEは製造誤差を持っており、その影響が0次光として顕著に現れる。簡単のために、像面上にビームスポットが等間隔で1直線上に並ぶ一次元分岐の場合を考える。

【0113】像面の中心から対称に奇数個のスポットが並ぶとする。この場合、中心から0次回折光、 ± 1 次光、 ± 2 次光…とスポットが続く。つまり、中央のスポットが0次光である。各スポットが等しい強度を有するようにDOEを設計することが可能である。しかしながら、実際のDOEが製造誤差（段差の深さ誤差、パターンの幅誤差など）を有すると、特に0次光の強度の増減として、その影響が大きく現れる。等しいエネルギーで

* 穴パターンで穴開け加工を実現することができる。転写倍率 $M = b/a = f/(a-f) = (b-f)/f$ より、式(29)のスポット間隔の式は次のように書き換えることができる。

$$(32)$$

同等の大きさの穴を穿孔しようとするのであるから、0次光の強度の変動は問題である。

【0114】一方、分岐されたビームの数が偶数の場合は、本来光軸上にスポットはできない。 ± 1 次光、 ± 3 次光、 ± 5 次光というように中心（光軸上の点）をはずして、間隔が2になるようにスポットが並ぶ。0次光というのは像面の中央にできるスポットである。製造誤差によって本来存在しないはずのスポットが現れてしまうことになる。

【0115】プリント基板に穴を開けようとする場合、上記の偶数分岐のように、光軸中心に不要な穴があいてしまうということが起こり得る。但し、余分の穴があいても差し支えないというのであれば、これまで述べたフラウンホーファ型（フーリエ変換型）のDOEを用いて差し支えない。また、上記の奇数分岐のように、0次光の位置にも穴がかけられる場合、強度の差異によって穴の径が多少相違する可能性がある。この場合も、そのようなことは差し支えないというのであれば、これまで説明したフラウンホーファ型DOEを用いれば良い。しかし、どの穴の径も均一にしたいし不要な穴が穿孔されては困るというのであれば、上記のように0次光の発生の問題があるフラウンホーファ型（フーリエ変換型）DOEではなお不十分と言わねばならない。

【0116】もう一つの欠点は、拡大縮小の自由度の低さである。図7によって述べたように、フラウンホーファ型DOEでもレンズ前焦点からDOEを前後に変位させる事によって像面でのパターンを拡大縮小できる。しかし、それは $\pm 1\%$ といったごくごく狭い範囲での拡大縮小である。それは式(29)を見てわかるように、 $(b-f)$ が余り大きくないためである。あるいは、式(32)で M が小さいためである。前述のようにエキスパンダの調整で $(b-f)$ を大きくしたり、マスクの位置変更で M を大きくしたりできるが、現実の光学系としては限度がある。また、DOEの変位 (Δ) を余り大きくするとテレセントリック性を損なうことになる。このように、フラウンホーファ型DOEの場合には、拡大縮小を余り大きくできない。

【0117】それで、0次光の問題を解消し拡大縮小の自由度を拡大するためには、フラウンホーファ型（フーリエ変換型）でなくて、フレネル型のDOEを用いるということが有用となる。ここで、フレネル型DOEについて説明する。それはフラウンホーファ型DOEに集光レンズの機能を追加したものだということができる。もちろん実際に集光レンズがあるのではなくDOE

の機能の中にレンズの作用が織り込まれているのである。レンズ機能があるのでDOEは単に分岐するのではなく（焦点距離が無限大）、有限焦点距離で収束あるいは発散する回折光を発生する。つまり、有限焦点距離のDOEというのがフレネル型DOEの特性である。

【0118】図18は通常のフラウンホーファー型のDOEの回折を説明する図である。入射ビームが平行光であるので、全ての次数の回折光がDOEから平行光で出ている。簡単のため、ここでは3つの回折光しか描いていないが実際にはこの他にも回折光が出る。分岐のみであり、平行な入射ビームに対し、各分岐ビームも平行光であることが重要である。図19は、フレネル型DOEの回折を説明する図である。収束光（正パワー）、発散光（負パワー）の何れでも可能であるが、ここでは収束光の場合を述べる。このフレネル型DOEでは全ての次数の回折光が平行光でなくて収束光となっている。収束点は光軸に垂直の共通の平面（焦平面）上にある。この平面と光軸の交点が焦点である。

【0119】レンズやミラーでないのに焦点があるというのは変に思うかもしれないが、回折光が収束する点という意味でやはり焦点だといってよい。このような正の屈折力を持つ場合だけでなく発散型の負の屈折力を持つフレネル型DOEもありうる。有限の焦点距離の回折型光学部品というのは少し考えにくいかもしれないが、後に説明する。先に、有限焦点距離のDOEを使うと先ほど述べた問題を解決できる、ということについて説明しよう。

【0120】DOE自身が有限の焦点距離（正でも負でもよい） f_1 を持つから、分岐された1次、2次、3次、…、 n 次の各ビームはDOEの後方 f_1 の場所で収束する。もしもDOEの後方 f_1 のところにスクリーンを置けば、0次回折光、 ± 1 次、 ± 2 次…の回折光が等間隔のスポットを像面に形成する。どの次数の回折光でも収束点までの距離は同一であり f_1 である。ところが0次光（上記分岐の0次回折光は回折されて収束しているので、ここで言う0次光とは異なる）はそもそもDOEで回折されなかったものであるから入射光と同じく平行光のままである。つまり焦点距離が無限遠にある。0次光は f_1 のスクリーンに結像しない。だから0次光が*

$$(u + f_1)^{-1} + (v + f_1)^{-1} = f_1^{-1} \quad (33)$$

となるので、

$$uv = f_1^2 \quad (34)$$

である。焦点から測った距離の積が焦点距離の2乗に等しいというのはよく知られている性質である。同様に第2レンズ L_2 についても

$$u'v' = f_2^2 \quad (35)$$

という性質がある。さらに拘束条件が課される。

$$v + u' = \delta \quad (36)$$

【0124】二つのレンズを合成した時の前焦点を P_1 とする。これは P_1 を通り L_1 、 L_2 を通った出射ビーム

*スポットを作らない。これがレンズで集光するフーリエ型DOEの場合の0次光と決定的に異なる点である。プリント基板の穴の穿孔に使う場合は、0次光は基板を焼き切るような集合したパワーを持たない。だから0次光の問題は解決される。そのような事はDOEだけでも成り立つしレンズを使っても同じように成り立つ。いずれにしても0次光は問題にならない。

【0121】0次光問題よりも、なおフレネル型DOEの優れた点は、拡大縮小の自由度の増加である。DOE単独ではそのような自由度は発生しない。しかしレンズを組み合わせることによって拡大縮小が可能となる。DOEの焦点距離を f_1 、これと組み合わせたレンズの焦点距離を f_2 とする。図20にフレネル型DOEと $f \sin \theta$ レンズを組み合わせた光学系を示す。このような配置でDOEとレンズを設けると、レンズ、DOE間の間隙を変えることによって拡大縮小が可能になる。図20においてDOEと $f \sin \theta$ レンズの距離を $f_2 - \Delta$ とする。 $f \sin \theta$ レンズと像面との距離をバックフォーカス B_f とする。

【0122】ここで図21によって2レンズ系（薄肉レンズ）における焦点、焦点距離、主点などについて一般的な定義を述べる。第1レンズ L_1 は焦点距離 f_1 を持つとする。前焦点が F_1 で後焦点が F_1' である。 L_1 の主点（薄肉レンズであるので前側、後側とも同じ）を O_1 とすると、 $O_1 F_1 = O_1 F_1' = f_1$ 。第2レンズ L_2 は焦点距離 f_2 を持つとする。前焦点が F_2 で後焦点が F_2' である。 L_2 の主点を O_2 とすると、 $O_2 F_2 = O_2 F_2' = f_2$ 。光軸 $O_1 O_2$ 上においてレンズ L_1 、 L_2 が距離 e だけ離れているとする。光軸 $O_1 O_2$ 上の物体 S_1 の L_1 による像が S_2 に生じる。 S_2 の L_2 による像が S_3 に生じるとする。レンズ L_1 において、前焦点 F_1 から物点 S_1 までの距離を u 、後焦点 F_1' から像点 S_2 までの距離を v とする。レンズ L_2 において、前焦点 F_2 から像点 S_2 までの距離を u' 、後焦点 F_2' から像点 S_3 までの距離を v' とする。 L_1 の後焦点 F_1' と L_2 の前焦点 F_2 の距離は δ とする。 $\delta + f_1 + f_2 = e$ である。

【0123】薄肉レンズの公式から

μ が無限遠（ v' が無限大）に像を作ることによって定義される。式（35）から $u' = 0$ となるので、式（36）からそのとき $v = \delta$ である。式（34）から前焦点 P_1 （ u_1 とする）は

$$u_1 = f_1^2 / \delta \quad (37)$$

である。

【0125】二つのレンズを合成した時の後焦点を P_2 とする。光軸に平行なビーム（無限遠から来るビーム）が L_1 、 L_2 を通り光軸上の点 P_2 を通る場合その点を後焦点という。式（34）から $v = 0$ となるので、式

(3'6) からそのとき $u' = \delta$ である。式 (35) から後焦点 P_2 (v_1' とする) は

$$v_1' = f_2^2 / \delta \quad (38)$$

である。複合レンズ系においては主面、主点Hというものを定義する。これはそこに存在した物体あるいは像の*

$$\text{倍率 } (f_1 + v) / (f_1 + u) = v / f_1 = f_1 / u \quad (39)$$

だからである。 L_2 による像倍率は v' / f_2 である。

これを掛けたものが二つのレンズの倍率であり主点H、

主面ではこの倍率が1として定義されるので、

【0127】

$$f_1 v_1' / f_2 u_H = 1 \quad (40)$$

である。サフィックスHは主点ということを示す。式

(34)、(35)、(36) から、

※

$$\Phi = u_1 - u_H = \frac{f_1^2}{\delta} - \frac{f_1(f_1 + f_2)}{\delta} = -\frac{f_1 f_2}{\delta} \quad (43)$$

ここで $\delta = e - f_1 - f_2$ である。レンズの間隔が e である。以下の話はこのような準備があって初めて理解できよう。

【0129】図20においてDOEとレンズの前側主点の距離を d とする。これは e と等しい。DOE・レンズの間隔 d が f_2 であれば ($e = f_2$) 全系の焦点距離はレンズの焦点距離 f_2 に等しい。 $e = f_2$ であるから、 $\delta = -f_1$ であって、式 (43) の Φ が f_2 となるからである。

【0130】ところがDOE・レンズ間の距離が丁度 f_*

(ロ) $\Delta > 0$ の場合、つまりDOEをレンズに近づける場合、

$$f_1 > 0 \text{ (正レンズ) ならば } f < f_2 \quad (45)$$

$$f_1 < 0 \text{ (負レンズ) ならば } f > f_2 \quad (46)$$

(ハ) $\Delta < 0$ の場合、つまりDOEをレンズから離す場合、

$$f_1 > 0 \text{ (正レンズ) ならば } f > f_2 \quad (47)$$

$$f_1 < 0 \text{ (負レンズ) ならば } f < f_2 \quad (48)$$

【0132】このようにDOEとレンズの間隔を f_2 からずらすことによって、 f が変化する。 f が変化すると像面でのパターンが拡大縮小する。つまり f によって倍率が決まるが、 f の変化によってパターンの倍率を変化☆

$$\Delta = 0 \text{ mm なら、 } f = 100 \text{ mm} \quad (49)$$

$$\Delta = +10 \text{ mm なら、 } f = 98 \text{ mm} \quad (50)$$

$$\Delta = -10 \text{ mm なら、 } f = 102 \text{ mm} \quad (51)$$

【0134】このように全系の焦点距離が $\pm 2\%$ 変わるので倍率も $\pm 2\%$ 変動することになる。このときバックフォーカスは後述の式 (52) を用いて計算すると、0.8 mm しか変動しない。像面の移動はこのような微小であるので、レンズとワーク面との距離の調整 (フォーカス調整) は少しでよい。

【0135】レンズを用いたときの0次光の問題をここ◆

$$B_f = f_2 \{ 1 - f_2 / (f_1 + \Delta) \} \quad (52)$$

である。レンズは0次光 (平行光) を後方の f_2 の位置に集光させる。ところが回折光は B_f の位置に集光させ*

$$s = f_2 - B_f = f_2^2 / (f_1 + \Delta) \quad (53)$$

* 倍率が1である点として定義される。これは少しわかりにくい焦点距離の定義のために必要な概念であり理解しなければならない。 L_1 による像の倍率は f_1 / u である。

【0126】なぜなら、式 (34) より、

$$\text{※ } v_H' = f_2 (f_1 + f_2) / \delta \quad (41)$$

$$u_H = f_1 (f_1 + f_2) / \delta \quad (42)$$

【0128】二つのレンズの合成系において、焦点距離

10 Φ は、前主点から前焦点までの距離として定義される (後主点から後焦点でも同じ値である)。

【数2】

★₂ でなくて、 $f_2 - \Delta$ であったとする。つまりDOEが f_2 でなく、それより Δ だけレンズに接近していると

20 これを式 (43) に代入して合成焦点距離 f (Φ の代わりに f と書く) は

$$f = f_1 f_2 / (f_1 + \Delta) \quad (44)$$

となる。

【0131】(イ) $\Delta = 0$ ならば $f = f_2$ である。これは、DOEがレンズの前側焦点にある場合を意味する。

☆ させることができる。

【0133】たとえば、 $f_1 = 500 \text{ mm}$ 、 $f_2 = 100 \text{ mm}$ とする。

40◆ で述べよう。図20でレンズの後側主点と像面 (ワーク面; 例えばプリント基板の面) の距離をバックフォーカス B_f という。第1レンズに平行光が入っているから像面は後焦点 v_1' (式38) となる。それは F_2' から測ったものだから第2レンズの後側主点から測れば $v_1' + f_2 = B_f$ となる。

【0136】

$$\text{※ } \text{回折光と0次光の集光点が前後に、}$$

【0137】

だけずれている。つまり回折光と0次光が前後に分離されたということである。

【0137】像面つまりワーク（例えばプリント基板）面をB_rの位置に調整すると、0次光はそれよりsだけ後方にずれる。像面では0次光は結像しないから殆どパワーがない。つまり0次の位置にスポットを作らない。たとえばf₁=1000mm、f₂=100mmだとし、Δ=-10mm~+10mmの範囲で、s=10mmにもなる。

【0138】本発明の新規な点はDOEとfsinθレンズを組み合わせることでプリント基板穴開けをするところにある。DOE自体にも工夫があり、それはフレネル型DOEをも利用するということである。フーリエ型（フラウンホーファー型）のDOEとどう違うのかということをも明らかにしなければならない。初めにフラウンホーファー型DOEを説明する。

【0139】図18において、左から波長λの単色の平面波a(x, y)exp(jkz - jωt)が入射する*

$$\Psi(x, y) = a(x, y) t(x, y) \quad (54)$$

となる。フーリエ型DOEの場合には通常t(x, y)には規則正しい繰り返しの要素が含まれる。実際空間周期Λで同じようなパターンが繰り返すようになっている。

【0142】DOEのすぐ後ろに中心厚D、焦点距離fの集光レンズが置かれたとする。集光レンズの(x, y)面での厚さをq(x, y)とすると、レンズを直進することによる位相の変化はkD + k(n-1)q

$$f^{-1} = (n-1)(\rho_1^{-1} - \rho_2^{-1}) \quad (55)$$

であるが、幾何学的な考察から、

$$q(x, y) = (\rho_1^2 - r^2)^{1/2} + (\rho_2^2 - r^2)^{1/2} - \rho_1 + \rho_2 + D \quad (56)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (57)$$

となるはずである。但しDは中心r=0におけるレンズの厚みである。

$$q(x, y) = D - (r^2/2) \{ (1/\rho_1) + (-1/\rho_2) \} \quad (58)$$

となる。すると式(55)より、

$$kD + k(n-1)q(x, y) = knD - kr^2/2f = knD - k(x^2 + y^2)/2f \quad (59)$$

である。つまり集光レンズをDOEの後ろに置くことは(x, y)の波面に位相遅れ(式59)を与えるということである。レンズ面での位相U(x, y)は *

$$U(x, y) = \Psi(x, y) \exp[jkD] \exp\{jk(n-1)q\} \\ = a(x, y) t(x, y) \exp[jknD] \exp\left\{-\frac{jk(x^2 + y^2)}{2f}\right\} \quad (60)$$

【0148】DOEの後ろfの距離に像面（ワーク）を置く。像面での(x, y)座標をレンズでのx、yと区別するために(ξ, η)とする。ホイヘンスの原理によ

*とする。平面波というのはexp(jkz - jωt)によって表現される。進行方向をz方向とする場合、任意のxy面での位相が同じである波である。位相がxy面で同一だから波面は当然にxy面に平行である。振幅a(x, y)は当然にzやtを含まない。kは波数といい2π/λである。ωは角振動数であり、ω=2πf=2πc/λである。

【0140】DOEは平板形であり透過率の絶対値は1であるが透過した波の位相が2π/2^m（mは整数）刻みで局所的に異なるようになっている。DOEは透過光の位相を変調する素子だということがいえる。そこで透過光の位相変調分布をt(x, y)によって表現する。t(x, y)=exp(jφ(x, y))というような関数である。絶対値は1であるが位相が変わるだけである。平面波であってz方向に直進するからDOEを透過したときの(x, y)面での波動関数Ψ(x, y)は【0141】

(x, y)ということになる。nはレンズ屈折率である。つまり波動関数でいうとexp[jkD]exp{j k(n-1)q(x, y)}を掛けるということである。

【0143】球面レンズであればq(x, y)を焦点距離fによって簡単に置き換えることができる。レンズ前面、後面の物界側に凸を正とした曲率半径をρ₁、ρ₂とすると、

★ ★ 【0144】

☆ 【0145】r/ρ₁、r/ρ₂が1よりずっと小さいという近似の範囲でq(x, y)は

◆ ◆ 【0146】

40* 【0147】

【数3】

って、(x, y)での波動関数による、像面(ξ, η)の点での波動関数へ寄与は、exp{jks}と面積dxdyをかけてjλfでわたったものである。但しsはレ

レンズ面 (x, y) と、像面 (ξ, η) の距離である。

* s はレンズ面の一点と像面の一点との距離であり、

【0149】

【数4】

$$\frac{U(x, y) \exp(jks) dx dy}{j\lambda f} \quad (61)$$

$$s^2 = f^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 \quad (62)$$

であるが、 f の方が x, y 方向の長さよりも長いから、※ ※【数5】

$$s = f + \frac{x^2 + y^2}{2f} + \frac{\xi^2 + \eta^2}{2f} - \frac{x\xi + y\eta}{f} \quad (63)$$

というように近似できる。

★得られるので、

【0150】像面の (ξ, η) 点での波動関数 $V(\xi, \eta)$ は x, y によってレンズ面で積分することによって★

【数6】

$$\begin{aligned} V(\xi, \eta) &= \frac{1}{j\lambda f} \iint U(x, y) \exp(jks) dx dy \\ &= \frac{1}{j\lambda f} \iint a(x, y) \exp\left\{-\frac{jk(x^2 + y^2)}{2f}\right\} \exp\left\{jk\left(f + \frac{x^2 + y^2}{2f} + \frac{\xi^2 + \eta^2}{2f} - \frac{x\xi + y\eta}{f}\right)\right\} dx dy \\ &= \frac{1}{j\lambda f} \exp\left\{\frac{jk(\xi^2 + \eta^2)}{2f}\right\} \iint a(x, y) \exp\left\{-\frac{jk(x\xi + y\eta)}{f}\right\} dx dy \quad (64) \end{aligned}$$

【0151】となる。(式(60)の $\exp[jkn]$ ☆を $H(\xi, \eta)$ とし次のように定義するとすれば、
D] の項は省略する。) 式(64) はフーリエ変換を意 【0152】

味する。つまり任意の関数 $h(x, y)$ のフーリエ変換 ☆ 【数7】

$$H(\xi, \eta) = \frac{1}{j\lambda f} \iint h(x, y) \exp\left\{-\frac{2\pi j(\xi x + \eta y)}{\lambda f}\right\} dx dy \quad (65)$$

【数8】

$$V(\xi, \eta) = \left[\exp\left\{\frac{jk(\xi^2 + \eta^2)}{2f}\right\} \right] \left[AT\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) \right] \quad (66)$$

ということになる。AT というのは a と t の積のフーリエ変換ということである(これは、 a のフーリエ変換と t のフーリエ変換のコンボリューションになる)。

【0153】強力なパルスレーザを光源に用いるが $a(x, y)$ というのはガウシアンビームの強度の (x, y) 面での変化である。これは DOE パターン $t(x, y)$ に比べて変化率が小さいから、DOE の積分の範囲 ◆40

◆では $a(x, y) = 1$ というように仮定できる。実際の設計ではビームの強度分布を入れて計算すればよい。ここでは DOE のあらましを述べるのが目的であるから、計算を簡略化する。そのような簡易な仮定では、

【0154】

【数9】

$$V(\xi, \eta) = \left[\exp\left\{\frac{jk(\xi^2 + \eta^2)}{2f}\right\} \right] \left[T\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) \right] \quad (67)$$

となる。 V は振幅分布であるが、穴開けのような場合、重要なのは強度分布である。式(67)の絶対値の2乗が強度分布を与える。2乗すると式(67)の [...] の部分は消える。 $|V(\xi, \eta)|^2 = |T(k\xi/f, k\eta/f)|^2$ である。つまり像面での強度パターンは、 $t(x, y)$ のフーリエ変換で求められることにな

る。

【0155】DOE の関数 $t(x, y)$ に周期構造があるので $\pm n$ 次回折 ($n = 0, 1, 2, \dots$) というようにビームが分岐される。 x 方向に空間周期 Λ_x 、 y 方向にも空間周期 Λ_y を持つとすると、

【0156】

$$t(x, y) = t(x + m\Lambda_x, y + l\Lambda_y) \quad (68)$$

$$m, l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (69)$$

であるということが要求される。但し以後の積分や計算において x と y は独立に行えるから Λ_x, Λ_y が混同される恐れはないので、式の形を少しでも単純化するためサフィックス x, y を省いて示す。 Λ_x は Λ_y と等しい*

* こともあり等しくない事もある。しかし以後はどちらも Λ と書いている。それは等しいということではない。
【0157】すると $t(x, y)$ のフーリエ変換は、
【数10】

$$\begin{aligned} T(\xi, \eta) &= \frac{1}{j\lambda f} \iint t(x, y) \exp\left\{-\frac{2\pi j(\xi x + \eta y)}{\lambda f}\right\} dx dy \\ &= \frac{1}{j\lambda f} \sum \sum \exp\left\{-\frac{2\pi j(\xi m\Lambda + \eta l\Lambda)}{\lambda f}\right\} \int \int t(x, y) \exp\left\{-\frac{2\pi j(\xi x + \eta y)}{\lambda f}\right\} dx dy \quad (70) \end{aligned}$$

となる。但し Σ は m, l についてパターンの繰り返し数について全部加えるということである。 $\int \int$ というのは一つの基本パターン ($\Lambda \times \Lambda$) の内部だけの \int を意味する。これを $s(\xi, \eta)$ とする。
【0158】
【数11】

$$s(\xi, \eta) = \frac{1}{j\lambda f} \int \int t(x, y) \exp\left\{-\frac{2\pi j(\xi x + \eta y)}{\lambda f}\right\} dx dy \quad (71)$$

これはパターンの設計によって多様な変化がある。DOE の設計というのはそれに尽きるのである。つまり、回折自体は DOE の位相分布全体に関連して起こるが、フーリエ変換型の場合、基本パターンがいくつも繰り返す★
★ という繰り返し構造となっているので、その一同期分の位相分布のフーリエ変換 $s(\xi, \eta)$ のみの計算に単純化できるのである。
【0159】

$$T(\xi, \eta) = \sum \sum \exp\left\{-\frac{j2\pi(\xi m\Lambda + \eta l\Lambda)}{\lambda f}\right\} s(\xi, \eta) \quad (72)$$

基本のパターン ($\Lambda \times \Lambda$) が x 方向に K 、 y 方向に H だけあるとすると、 $s(\xi, \eta)$ とは無関係に積算ができ☆
☆ ので、
【数12】

$$T(\xi, \eta) = \frac{s(\xi, \eta) \sin\left(\frac{\pi K \xi \Lambda}{\lambda f}\right) \sin\left(\frac{\pi H \eta \Lambda}{\lambda f}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \xi \Lambda}{\lambda f}\right) \sin\left(\frac{\pi \eta \Lambda}{\lambda f}\right)} \quad (73)$$

となるのである。

【0160】これが離散的な回折点を表現している。それはどうしてか？ x 方向について、 ξ が $\lambda f / \Lambda$ の整数倍でないとき、 $|\sin(\pi K \xi \Lambda / \lambda f) / \sin(\pi \xi \Lambda / \lambda f)|$ の値は K に比べ小さい値にしかならない。ところが ξ が $\lambda f / \Lambda$ の整数倍のときはこの値は K となる。 y 方向についても η が $\lambda f / \Lambda$ の整数倍のときのみ $|\sin(\pi H \eta \Lambda / \lambda f) / \sin(\pi \eta \Lambda / \lambda f)|$ は H になる。ということは、 $T(\xi, \eta)$ は ξ が $\lambda f / \Lambda$ の整数倍、 η が $\lambda f / \Lambda$ の整数倍の点 (ξ, η) だけに有限の値をもち、それ以外はほとんど 0 である。これがフーリエ変換型 DOE で位相分布が繰り返さ◆

◆ れていることが意味するところである。

【0161】プリント基板の穴の間隔を $\lambda f / \Lambda$ に決めることによってレーザ光によって多数の穴を同時に穿孔することができるというわけである。以上の話はフーリエ型（フラウンホーファー型）DOE に関するものである。次にフレネル型 DOE について説明する。

【0162】図19はフレネル型 DOE を示す。平面波の振幅を $a(x, y)$ とし DOE による透過後の振幅を $t(x, y)$ とする。式(54)と同様に DOE を通過した後の光の波動関数 $\Psi(x, y)$ はこれらの積によって与えられる。

$$\Psi(x, y) = a(x, y) t(x, y) \quad (74)$$

DOE 自体に集光作用があるので集光レンズを置かない。すると f だけ後方にある像面での波動関数 $V(\xi, \eta)$ は、
【0163】
【数13】

$$V(\xi, \eta) = \frac{1}{j\lambda f} \iint \Psi(x, y) \exp(jks) dx dy \quad (75)$$

となる。sはDOE背後の(x, y)と像面の(ξ, η)の距離である。

$$s^2 = f^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 \quad (76)$$

【数14】

$$\begin{aligned} V(\xi, \eta) &= \frac{1}{j\lambda f} \iint a(x, y) t(x, y) \exp\left\{jk\left(f + \frac{x^2 + y^2}{2f} + \frac{\xi^2 + \eta^2}{2f} - \frac{x\xi + y\eta}{f}\right)\right\} dx dy \\ &= \frac{1}{j\lambda f} \left[\exp\left\{\frac{jk(\xi^2 + \eta^2)}{2f}\right\} \right] \iint a(x, y) t(x, y) \exp\left\{\frac{jk(x^2 + y^2)}{2f}\right\} \exp\left\{-\frac{jk(x\xi + y\eta)}{f}\right\} dx dy \quad (77) \end{aligned}$$

【0165】フーリエ型に比べてフレネル型の場合レンズがないから、 $\exp\{jk(x^2 + y^2)/2f\}$ の項が積分の中に余分に含まれる。ここでも話を簡単にするために $a(x, y) = 1$ とおくと、 $t(x, y) \exp\{jk(x^2 + y^2)/2f\}$ のフーリエ変換を $T(\xi/\lambda f, \eta/\lambda f, f)$ として、

$$V(\xi, \eta) = \left[\exp\left\{\frac{jk(\xi^2 + \eta^2)}{2f}\right\} \right] \left\{ T\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) \right\} \quad (78)$$

となるのである。ただし $t(x, y) \exp\{jk(x^2 + y^2)/2f\}$ のフーリエ変換が周期構造をもつた★

$$t(x, y) = t(x + m\Lambda_x, y + l\Lambda_y) \quad (68)$$

$$m, l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (69)$$

というような単純な周期構造ではいけない。☆いうことである。式(68)に代えて、 $k(x^2 + y^2)/2f$ を含んだものが周期構造をもつという必要がある。少しこれは分かりにくい☆

$$\begin{aligned} &t(x, y) \exp\left\{\frac{jk(x^2 + y^2)}{2f}\right\} \\ &= t(x + m\Lambda_x, y + l\Lambda_y) \exp\left\{\frac{jk\{(x + m\Lambda_x)^2 + (y + l\Lambda_y)^2\}}{2f}\right\} \quad (79) \end{aligned}$$

$m, l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (80) ◆ $y^2)/2f\}$ のフーリエ変換 $S(\xi, \eta)$ は、

【0169】すると $t(x, y) \exp\{jk(x^2 + y^2)/2f\}$

$$\begin{aligned} S(\xi, \eta) &= \frac{1}{j\lambda f} \iint t(x, y) \exp\left\{\frac{jk(x^2 + y^2)}{2f}\right\} \exp\left\{\frac{-2\pi j(\xi x + \eta y)}{\lambda f}\right\} dx dy \\ &= \frac{1}{j\lambda f} \sum \sum \exp\left\{\frac{-2\pi j(\xi m\Lambda_x + \eta l\Lambda_y)}{\lambda f}\right\} \int \int t(x, y) \exp\left\{\frac{jk(x^2 + y^2)}{2f}\right\} \exp\left\{\frac{-2\pi j(\xi x + \eta y)}{\lambda f}\right\} dx dy \quad (81) \end{aligned}$$

ということになる。f' f' は単位のパターン内での積分である。

$$\sigma(\xi, \eta) = \frac{1}{j\lambda f} \int \int t(x, y) \exp\left\{\frac{jk(x^2 + y^2)}{2f}\right\} \exp\left\{\frac{-2\pi j(\xi x + \eta y)}{\lambda f}\right\} dx dy \quad (82)$$

【0171】

50 【数19】

$$S(\xi, \eta) = \frac{\sigma(\xi, \eta) \sin\left(\frac{\pi K \xi \Lambda_x}{\lambda f}\right) \sin\left(\frac{\pi H \eta \Lambda_y}{\lambda f}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \xi \Lambda_x}{\lambda f}\right) \sin\left(\frac{\pi \eta \Lambda_y}{\lambda f}\right)} \quad (83)$$

というようになる。

【0172】単位パターン内のフーリエ変換 $s(\xi, \eta)$ が、 $\sigma(\xi, \eta)$ になるのは理解し易いことである。しかし式(79)のような周期条件がDOEに要求*10

*されるのでフレネル型DOEの設計は、フラウンホーファ型DOEに比べて困難となる。つまり式(79)から任意の整数 m, l に対して、
【数20】

$$t(x + m\Lambda_x, y + l\Lambda_y) = t(x, y) \exp\left\{-\frac{jk(mx\Lambda_x + ly\Lambda_y)}{f}\right\} \exp\left\{-\frac{jk(\Lambda_x^2 m^2 + \Lambda_y^2 l^2)}{2f}\right\} \quad (84)$$

【0173】というような変則的な周期条件が要求されるのである。これは同じパターンの繰り返しというものではないからDOEの製作も難しくなる。しかしフレネル型DOEには0次光問題を回避し、像の拡大縮小の範囲を広げるという作用がある。さりながらDOEには柔軟性がないという難点は、フレネル型DOEでも同様である。

【0174】そうであればこそ、ガルバノミラー方式と混成した本発明の方式はより広範な用途に柔軟に対応できるのである。高速性、柔軟性を兼ね備えた優れた発明である。図12のように、回転円板によるDOEとガルバノミラーの両方式の切り替えを行う場合、フレネル型DOEを採用するならば、ガルバノミラーへの切り替え時に回転円板にはフレネル型DOEと同一焦点距離のレンズをセットする。

【0175】

【実施例】【実施例1（フラウンホーファ型（フーリエ型）DOE）】ここでは、フラウンホーファ型DOEの実施例を示す。これは分岐のみの機能を有するDOEである。フラウンホーファ回折で理論的に扱えるものであるからフラウンホーファ型という。それはDOEの位相分布のフーリエ変換で定式化できるものであるからフーリエ型ともいう。DOEの焦点距離というものを取って考えるとそれは焦点距離が無限大のものであるから、レンズが不可欠である。集光レンズとしてDOEの場合は $f \sin \theta$ レンズが最適である、ということを実に説明した。それでここでは $f \sin \theta$ レンズを用いる。 $f \sin \theta$ レンズ自体が新規なものであるから市販※

※のレンズを使うというわけにゆかない。そのようなものはないから $f \sin \theta$ レンズの設計から始める必要がある。

【0176】【DOEの設計】周期192.308 μ m、回折次数 $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ 焦点の位置においたプリント基板に5mm間隔で5つの穴を開けるようなパターン。

【0177】【 $f \sin \theta$ レンズの設計】

(A) 初期レンズ設定

○レンズ枚数 2枚 材質 ZnSe (屈折率2.403)

第1レンズ 第1面、第2面ともに球面

第2レンズ 第1面は球面、第2面は非球面

○波長 10.6 μ m

30 ○入射値位置 第1レンズ第1面より物界側50mm

○Fナンバー 6

○回折格子 周期192.308 μ m、回折次数 $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$

○出射角度 0度（テレセントリック）

【0178】(B) 変数設定

各面の曲率半径、厚み（間隔）、非球面係数、像面位置を変数とする。

【0179】(C) 拘束条件

○焦点距離 $f_2 = 127$ mm

40 ○レンズ厚み 3.5mm以上15mm以下

(D) 設計結果

【0180】

【表3】

$f \sin \theta$ レンズのデータ

レンズ番号	面番号	曲率半径 (mm)	厚み、間隔 (mm)	屈折率
L1	S1	-31.119	5.650	2.403
	S2	-35.100	65.255	
L2	S3	392.630	9.504	2.403
	S4	表4	147.661	

【0181】

* * 【表4】

f sin θ レンズの非球面データ

面番号	S 4	非球面係数	
1/c (mm)	-351.089	α_2	5.876×10^{-9}
k	-4.352	α_3	2.959×10^{-13}
		α_4	-1.466×10^{-15}
		α_5	2.702×10^{-19}

【0182】このレンズと先述のf θ レンズを用いてプリント基板に5mm間隔の穴を穿孔する実験をした。低次回折の穴間隔は5mmであるが、f θ レンズでは高次になると穴間隔が大きくなるため5次の穴の位置は25.26mmとなった。一方、f sin θ レンズの場合、25.00mmであった。プリント基板での穴間隔※

※に要求される精度は±20 μ mである。5次での誤差が+260 μ mもあるf θ レンズは利用できない。f sin θ レンズの場合は±20 μ m未満であり、高次の回折光まで穴開けに利用することができる。

【0183】

【表5】

DOE回折光をf θ レンズとf sin θ レンズによって

回折させたときの像面での5次回折光による穴の位置

	目標値	f θ レンズの場合	f sin θ レンズの場合
穴位置	25mm	25.26mm	25.00mm
誤差	-	+260 μ m	0 μ m

【0184】図8は、スポット間隔を0.5mmとしたときDOEを前焦点からレーザ側へ Δ だけずらしたときの間隔の変化を測定した結果を示すグラフである。ここでa=3302mm、b=132mm、f=127mm、M=0.04である。横軸は Δ (mm)であり、縦軸は間隔(mm)を示す。微小な範囲であるが穴間隔を微調整できる。テレセントリック性を損なわない程度で調整すればよい。

【0185】【実施例2(フレネル型DOE)】分岐機能のみのフラウンホーファー型に対し、集光機能(有限の焦点距離)をもたせたDOEも新しく考案されている。それはフレネル型のDOEという。つまりフーリエ型の通常の回折部品にレンズを組み合わせたような作用をDOE一つで行うような素子である。そのようなDOEを使うことの利点はすでに説明したように二つある。一つは0次光の影響を除去できるということである。もう一つはDOEの位置を調整して像の拡大縮小を行うことができるということである。

【0186】有限の焦点距離をDOE自体がもっているから集光レンズがなくても、その焦点距離の位置においてスクリーンに回折像を映し出すことができる。しかし、それだけでは大きな加工エリア内で一括穴あけ加工(テレセントリックであることも必須)することができないので、フレネル型DOEの場合にも集光レンズをすぐ後ろに設置する。その場合のレンズもf sin θ レンズが最適である。それはそうなのであるが、フラウンホーファー型DOEで最適のf sin θ とは異なる。フレネル型DOEは収束性(f正)あるいは発散性(f負)の回折ビームを発生するので、フラウンホーファー型に

適するf sin θ を使うと像面彎曲が発生し望ましくない。フレネル型DOEの場合はDOEの焦点距離f₁によって異なる新規のf sin θ を設計する必要がある。このf sin θ レンズをガルバノ方式でも用いる場合には、フレネル型DOEの代わりにそれと同じ焦点距離f₁のレンズを用いる。

【0187】【DOEの設計】DOEは、焦点距離がf₁=-500mmの負のパワーとした。周期192.308 μ m、回折次数n=0, 1, 2, 3, 4, 5焦点の位置においたプリント基板に5mm間隔で5つの穴を開けるようなパターン。

【0188】【f sin θ レンズの設計】

(A) 初期レンズ設定

○レンズ枚数 2枚 材質ZnSe(屈折率2.403)

第1レンズ 第1面は非球面、第2面は球面

第2レンズ 第1面は球面、第2面は非球面

○波長 10.6 μ m

○入射瞳位置 第1レンズ第1面より物界側50mm

○Fナンバー 6

○回折格子 周期192.308 μ m、回折次数n=0, 1, 2, 3, 4, 5

○出射角度 0度(テレセントリック)

【0189】(B) 変数設定

各面の曲率半径、厚み(間隔)、非球面係数、像面位置を変数とする。

【0190】(C) 拘束条件

○焦点距離 f₂=127mm

○レンズ厚み 3.5mm以上15mm以下

【0191】(D)設計結果

* * 【表6】

f sin θ レンズのデータ

レンズ番号	面番号	曲率半径 (mm)	厚み、間隔 (mm)	屈折率
L 1	S 1	表 7	5. 478	2. 403
	S 2	-37. 034	68. 782	
L 2	S 3	1962. 525	10. 740	2. 403
	S 4	表 8	179. 560	

【0192】

* * 【表7】

f sin θ レンズの非球面データ

面番号	S 1	非球面係数	
1 / c (mm)	-33.041	α_2	1.855×10^{-7}
k	0.069	α_3	-1.974×10^{-10}
		α_4	6.943×10^{-13}
		α_5	-1.716×10^{-16}

【0193】

* * 【表8】

f sin θ レンズの非球面データ

面番号	S 4	非球面係数	
1 / c (mm)	-204.464	α_2	-1.024×10^{-8}
k	-1.717	α_3	-3.485×10^{-12}
		α_4	1.877×10^{-15}
		α_5	-3.008×10^{-19}

【0194】このレンズと先述の $f \theta$ レンズを用いてプリント基板に5mm間隔の穴を穿孔する実験をした。図17にフレネル型DOEと $f \sin \theta$ レンズによる実験系を示す。低次回折の穴間隔は5mmであるが、 $f \theta$ レンズでは高次になると穴間隔が大きくなるため5次の穴の位置は25.26mmとなった。一方、 $f \sin \theta$ レ

☆ンズの場合、25.00mmであった。プリント基板での穴間隔に要求される精度は $\pm 20 \mu\text{m}$ である。5次の誤差が $+260 \mu\text{m}$ もある $f \theta$ レンズは利用できない。 $f \sin \theta$ レンズの場合は $\pm 20 \mu\text{m}$ 未満であり、高次の回折光まで穴開けに利用することができる。

【表9】

DOE回折光を $f \theta$ レンズと $f \sin \theta$ レンズによって

回折させたときの像面での5次回折光による穴の位置

	目標値	$f \theta$ レンズ の場合	$f \sin \theta$ レンズの場合
穴位置	25 mm	25. 26 mm	25. 00 mm
誤差	-	+260 μm	0 μm

こまではフラウンホーファー型DOEを使った実施例1と同様である。フレネル型DOEを使う実施例2はさらにそれを越える二つの効果がある。

【0195】「拡大縮小範囲の増大」DOE自身がここでは $f_1 = -500 \text{ mm}$ という発散性をもつので、次のようにして像を拡大縮小することができる。DOEとレンズの合成焦点距離 f は、

$$f = f_1, f_2 / (f_1 + \Delta) \quad (85)$$

となる。 Δ はDOEの、レンズの前焦点からのズレである。ズレ $\Delta > 0$ のとき、 $f_1 < 0$ ならば $f > f_2$ とな

◆る。逆に $\Delta < 0$ のとき、 $f_1 < 0$ ならば $f < f_2$ となる。フラウンホーファー型の場合 f_1 は実質的に無限大であるから上の式は常に $f = f_2$ となって f の変化を許さない。しかし実施例2ではフレネル型のDOEを使っており有限の f_1 をもっているから Δ の変化によって f の変動を引き起こすことができる。

【0196】実施例2において、 $f_1 = -500 \text{ mm}$ 、 $f_2 = 127 \text{ mm}$ であるから、

$$f = 500 \times 127 / (500 - \Delta) \quad (86)$$

となる。例えば

$$\Delta = 15 \text{ mm} \text{ のときには、} f = 130.9 \text{ mm} \quad (87)$$

$$\Delta = -15 \text{ mm} \text{ のときには、} f = 123.3 \text{ mm} \quad (88)$$

【0197】となる。スポットパターンの拡大縮小は、50 焦点距離 f にほぼ比例する。ここでは Δ の $\pm 15 \text{ mm}$ の

変化に対して焦点距離が±3%変動する。したがってΔを変える事によって±3%ものパターンの拡大縮小が可能となる。実施例1のフーリエ型DOEを使う場合は拡大縮小の範囲が±1%であった。実施例2ではその3倍に及ぶ拡大縮小が可能となる。つまり穴パターンの97%までの縮小、103%までの拡大ができる。

$$f_2^2 / (f_1 + \Delta) = 127^2 / (-500 + \Delta) \quad (89)$$

$$= -31.3 \text{ mm} \sim -33.3 \text{ mm} \quad (90)$$

となる。Δが0からずれても常に0次光焦点は像面より前方に30mm以上離れている。0次光は像面ではぼけてしまい像面では弱いノイズになるだけである。プリント基板を焼き切る程のパワーはない。つまり0次光を完全に排除することができる。

【0200】【像面の調整】レンズ前焦点からDOEを※

$$B_f = f_2 \{1 - f_2 / (f_1 + \Delta)\} \quad (91)$$

$$= 127 \times \{1 + 127 / (500 - \Delta)\} \quad (92)$$

によって計算される。Δ=-15mm～+15mmのとき、

$$B_f = 160.3 \text{ mm} \sim 158.3 \text{ mm} \quad (93)$$

である。その幅は2mmにすぎない。その程度の短い距離であるから、レンズ、像面（ワーク）間の距離を増減調整して常に焦点の位置に像面を合わせることができる。

【0202】

【発明の効果】DOEによってレーザビームを傾斜角の異なる多数のビームに分岐し $f \sin \theta$ レンズによって等間隔のスポットを像面に形成する。高い位置精度を保持しながら多点高速一括穿孔を行うことができる。 $f \sin \theta$ レンズを使うので高次回折光での位置ズレが起こらず高次回折光まで利用できる。高次の回折光をも利用できるからより多数の穴を一括穿孔できる。

【0203】ガルバノミラーとDOEを組み合わせるとすると、DOEの高速一括性とガルバノミラーの柔軟性が相補って使いやすく優れた穴あけ装置となる。DOEを二つのガルバノミラーの間に置くと、レンズのテレセントリック性を最大限に生かすことができる。

【0204】窓を幾つも有する回転円板に複数のDOEを取り付け回転させてDOEを切り替える事にすれば、多種類の一括パターン加工を高速で切り替えることができる。また回転円板の窓の一つを開口にしておく（フラウンホーファー型DOEの場合）か、DOEと同じ焦点距離のレンズをセットしておく（フレネル型）と、ビームを開口に通してガルバノミラー方式の運転を行うことができる。ガルバノミラー方式とDOE方式の切り替えが容易である。

【0205】レンズやビームエクシパンダなどで入射レーザ光の発散角を調整することと、回折型光学部品を前後に移動させることによって、穴間隔の拡大、縮小を行う事ができる。これによって、微小な穴間隔の補正が可能になる。加工すべき穴パターンの拡大、縮小を行う

※【0198】【0次光の排除】図17に示すように0次光の焦点は像面の前にある。0次光は像面に焦点を結ばないから0次光の影響が現れない。0次光を排除する事ができる。どの程度0次光焦点が像面から離隔しているか？という、Δ=-15mm～+15mmに対して、

※【0199】

※Δだけずらせると焦点距離 f が変化するので像面の位置も変更しなければならない。しかしそれは僅かな距離で調整容易である。この実施例において $f_1 = -500 \text{ mm}$ 、 $f_2 = 127 \text{ mm}$ であるから、バックフォーカス B_f は

★【0201】

ようにすることもできる。或いはピンホールマスクにレーザを入射させることによって、マスク転写光学系とすれば、ピンホールマスクの位置調整と回折型光学部品の移動によって、同様に穴間隔の拡大、縮小を行うことができる。

【0206】DOEとしてフラウンホーファー型のもの（焦点距離が無限大）を使うこともできるしフレネル型のものを使うこともできる。いずれのDOEを使用してもレンズとDOEの距離を変えることによってパターンを拡大縮小できる。特にフレネル型のものを利用すると拡大縮小の範囲を広くすることができる。またフレネル型DOEを使用すると、0次光の影響を消去することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】ガルバノミラー方式のレーザ穴開け装置の概略斜視図。

【図2】ガルバノミラー方式に好適の $f \theta$ レンズによってDOEビームを像面Iに集光した場合の光線追跡を説明する図。0次、1次、2次回折ビームが図示される。

【図3】回折型光学部品（DOE）の概略平面図。

40 【図4】回折型光学部品（DOE）の単位パターンの平面図。

【図5】図4のL-L断面図。

【図6】DOEからの回折光をレンズによって集光し像面Iにスポットとして照射することを説明する構成図。

【図7】DOEをレンズの前焦点から前方にΔだけずらすことによって像面での回折光の間隔がどのように変化するかを説明するための構成図。

【図8】DOEが前焦点にあるときのレーザ回折光照射スポットの間隔が0.50mmである光学系において、DOEを前方へずらせたとき、DOEの前方へのズレの

量と、レーザ回折光照射スポット間隔の関係を示すグラフ。

【図9】光線追跡法により光線のズレの2乗和を評価関数に含ませるため、レンズ面（入射瞳）に取った光線の分布と重みを説明する図。

【図10】DOEからの回折光を $f \sin \theta$ レンズによって集光し、像面1に結像させたものを示す光線図。0次、1次、2次、3次、4次、5次回折光が図示されている。

【図11】レーザビームをDOEによって回折させ多数の回折ビームとし、 $f \sin \theta$ レンズによって、スポット状の回折像を像面に形成しパッケージなどに多数の穴を穿孔する本発明のレーザ穴開け加工装置を示す斜視図。

【図12】回折型光学部品による多数回折ビーム生成と、ガルバノミラーによる揺動ビーム生成方式を組み合わせたハイブリッド方式を説明するための斜視図。

【図13】負焦点距離レンズと正焦点距離レンズを組み合わせ、負レンズの前焦点と正レンズの前焦点を合致させ平行入射ビームを直径の異なる平行出射ビームに変換するビームエキスパンダの概略図。

【図14】負焦点距離レンズと正焦点距離レンズを組み合わせ、負レンズの前焦点と正レンズの前焦点をずらせて平行入射ビームを発散出射ビームに変換するビームエキスパンダの概略図。

【図15】負焦点距離レンズと正焦点距離レンズを組み合わせ、負レンズの前焦点と正レンズの前焦点をずらせて平行入射ビームを収束出射ビームに変換するビームエキスパンダの概略図。

【図16】マスク転写系の概略構成図。

【図17】フレネル型DOEと $f \sin \theta$ レンズを組み*

*合わせた実施例2の光学系の概略構成図。

【図18】回折によりビームを多数に分岐するフラウンホーファー型DOE（フーリエ型）の回折を示す説明図。

【図19】有限の焦点距離を有する回折光を発生するフレネル型DOEの回折を示す説明図。

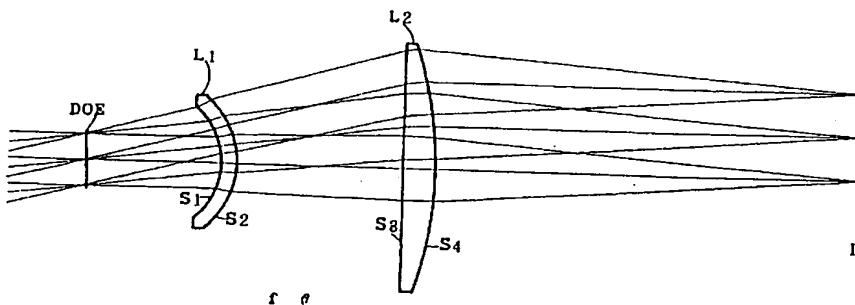
【図20】DOE、 $f \sin \theta$ レンズ、像面の関係を示す説明図。

【図21】2レンズ系の焦点距離、焦点、倍率、像位置の計算を説明するための説明図。

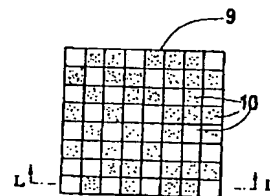
【符号の説明】

- 1 レーザビーム
- 2 x軸スキャンミラー
- 3 y軸スキャンミラー
- 4 $f \theta$ レンズ
- 5 プリント基板
- 6 穴
- 8 DOE
- 9 単位パターン
- 10 画素
- 11 厚い画素
- 12 薄い画素
- 13 回折ビーム
- 14 $f \sin \theta$ レンズ
- 15 パッケージ
- 16 穴
- 17 集光分割ビーム
- 18 ビーム
- 19 回転円板
- 20 窓

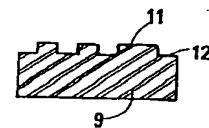
【図2】



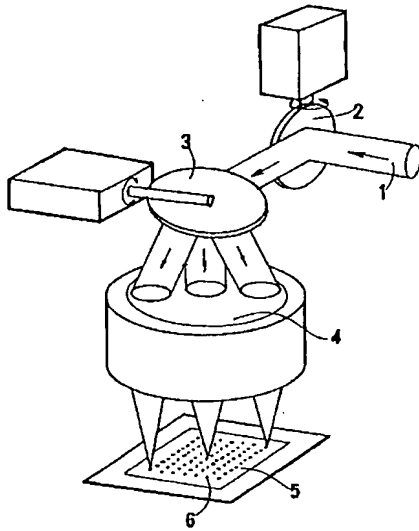
【図4】



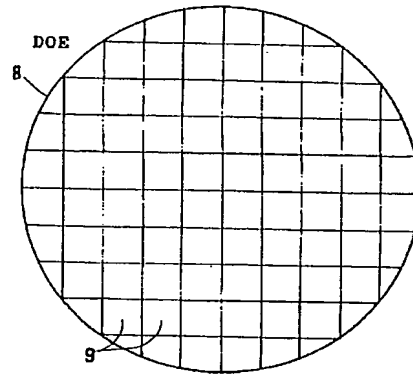
【図5】



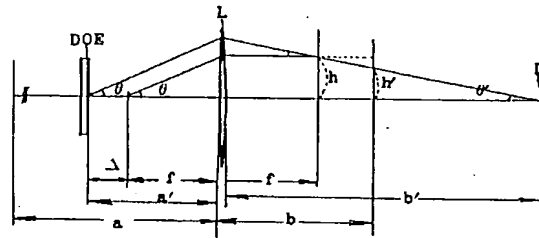
【図1】



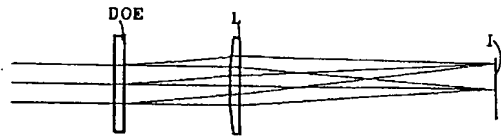
【図3】



【図7】



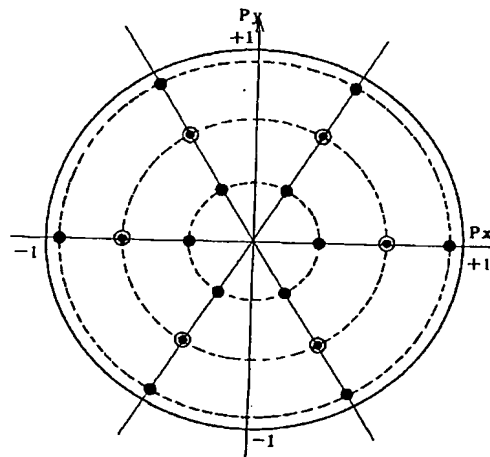
【図6】



【図9】

3 Rings $R=0.3357, 0.7071, 0.9420$

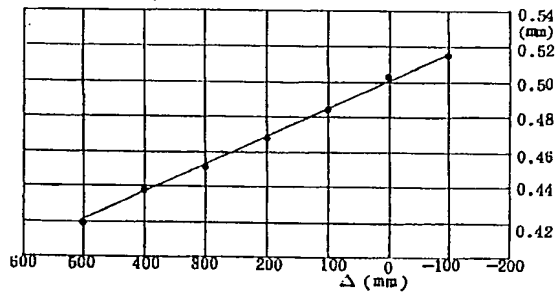
6 Arms $\theta = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ$



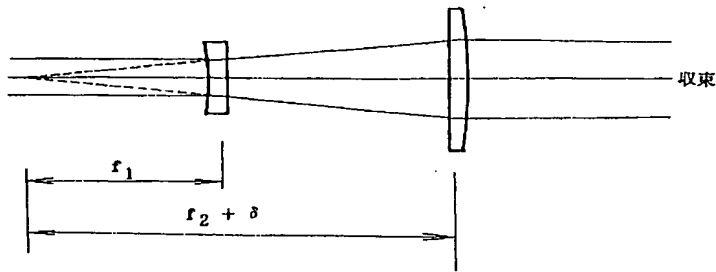
• $w_j = 0.048481$ 12

⊙ $w_j = 0.07757$ 6

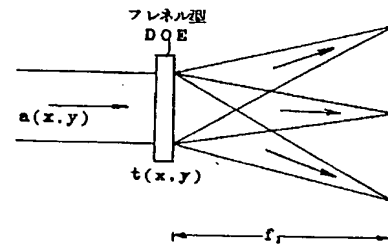
【図8】



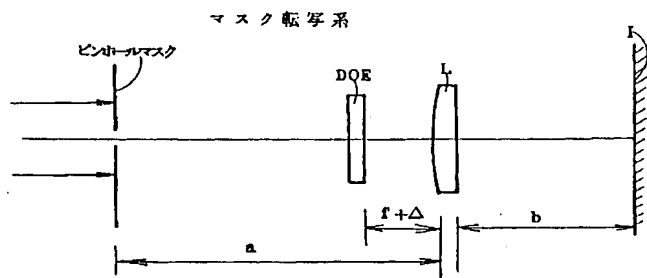
【図15】



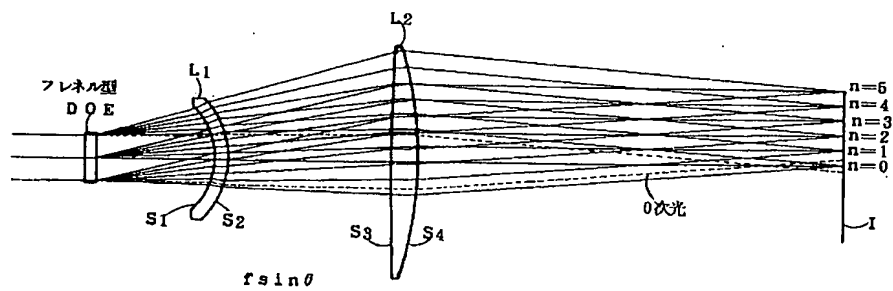
【図19】



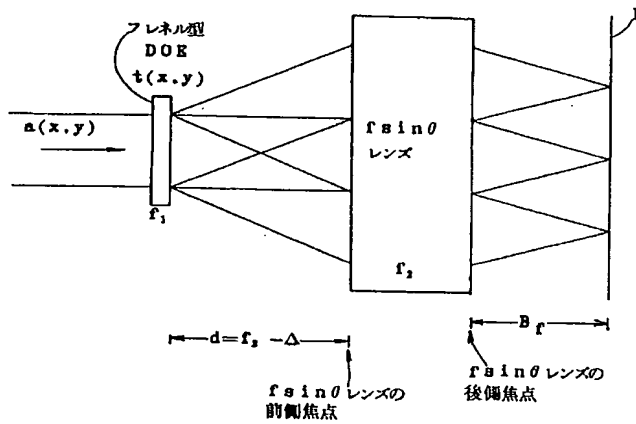
【図16】



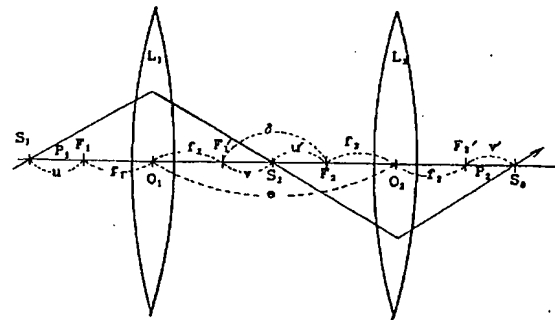
【図17】



【図20】



【図21】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.⁷

識別記号

F I

テーマコード (参考)

G 0 2 B 26/00

G 0 2 B 26/00

26/10

1 0 4

26/10

1 0 4 Z

H 0 5 K 3/00

H 0 5 K 3/00

N

// B 2 3 K 101:42

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.